

## THESIS / THÈSE

### MASTER EN SCIENCES INFORMATIQUES

#### Le raisonnement automatisé sur les systèmes physiques : prévision du comportement

De Swert, Pierre-Yves; Ternez, Philippe

*Award date:*  
1986

*Awarding institution:*  
Université de Namur

[Link to publication](#)

#### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

#### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

**LE RAISONNEMENT AUTOMATISE  
SUR LES SYSTEMES PHYSIQUES :  
PREVISION DU COMPORTEMENT**

**Mémoire présenté  
par Pierre-Yves De Swert  
et Philippe Ternez  
en vue de l'obtention du grade de  
licencié et maître en informatique.**

**Année académique 1985 - 1986**

Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements au professeur Monique Noirhomme qui a bien voulu accepter d'être le promoteur de notre mémoire.

Nous exprimons de même nos remerciements à son assistant Jorge Barreto, pour sa bienveillance dans la direction de notre mémoire, et pour les fructueuses discussions qui nous ont guidés dans la recherche d'une solution.

Nous devons également remercier monsieur Jacques Lefebvre, chef de travaux à l'UCL. Nous lui sommes très redevables de nous avoir fait découvrir la physique qualitative et de nous avoir enseigné les notions de base des graphes de liaison. En nous indiquant l'intérêt des graphes de liaison en physique qualitative, il a apporté une contribution substantielle dans la réalisation de notre mémoire.

Ces remerciements seraient toutefois incomplets si nous ne mentionnions pas nos parents envers qui nous nous sentons extrêmement obligés. Nous les remercions nous avoir supportés et soutenus tout au long de nos études.

## TABLE DES MATIERES

CHAP 0. Introduction.....	1
CHAP 1. Motivations du mémoire.....	3
1.1 Les modèles mathématiques.....	3
1.1.1 Les modèles mathématiques: outils pédagogiques.....	3
1.1.2 Les modèles mathématiques: outils cliniques.....	5
1.2 Les systèmes experts appliqués en médecine.....	7
CHAP 2. Recherche d'une solution.....	9
2.1 Méthode retenue: la physique qualitative.....	9
2.2 Alternatives.....	10
CHAP 3. Le point en physique qualitative.....	11
3.1 Introduction.....	11
3.2 Approche de De Kleer et Brown.....	12
3.2.1 Deux principes de la démarche.....	12
A) Principe de non-fonction dans la structure.....	12
B) Principe de localité.....	13
3.2.2 Modélisation de la structure.....	13
A) Les constituants de la structure.....	13
B) L'espace de quantité.....	13
C) Le calcul qualitatif.....	14
D) Modélisation des constituants.....	15
E) Les lois de connexions.....	18
3.2.3 Prédiction du comportement.....	19
A) Introduction.....	19
B) Les épisodes.....	19
C) Les états composites d'un dispositif.....	19
D) Description de l'algorithme d'environnement.....	20



E) Règles de construction des diagrammes.....	22
F) Utilisation du diagramme d'état.....	23
3.2.4 Explication du comportement.....	23
A) Explication du comportement inter-état.....	23
B) Explication du comportement intra-état.....	24
1.) La preuve logique en tant qu'explication du comportement.....	24
2.) Les exposés causaux en tant qu'explication.....	25
3.3 Approche de Forbus.....	29
3.3.1 Représentation des objets et des quantités.....	30
A) Les quantités.....	30
B) L'espace de quantité.....	32
C) Vues d'individu.....	34
D) Dépendances fonctionnelles.....	36
E) Histoires.....	37
3.3.2 Représentation des processus physiques.....	39
A) Spécification d'un processus.....	39
B) Les influences.....	41
3.3.3 Dédutions de base.....	42
A) Recherche des processus et vues d'individu possibles.....	42
B) Détermination de l'activité.....	42
C) Détermination des changements.....	43
D) Analyse limite.....	45
3.3.4 Processus et histoires.....	49
3.3.5 Raisonnement causal.....	51
3.4 Approche de Kuipers.....	54
3.4.1 Introduction.....	54
3.4.2 La représentation du temps.....	54
3.4.3 L'espace de quantité.....	55
3.4.4 Les contraintes.....	55

3.4.5	Description de la structure.....	57
3.4.6	Prédiction du comportement.....	58
CHAP 4.	Les fonctions du système.....	61
4.1	Introduction.....	61
4.2	Présentation des composants du modèle.....	61
4.3	Evolution du comportement du dispositif.....	62
4.4	Analyse des réactions du système face au changement.....	63
4.5	Caractéristiques générales du comportement du dispositif...	64
4.6	Choix d'une fonction à développer.....	64
CHAP 5.	Analyse théorique du simulateur qualitatif.....	65
5.1.	Introduction.....	65
5.2.	Description de la structure.....	66
5.2.1.	Espace de quantité.....	66
5.2.2.	Contraintes.....	71
A)	Contraintes arithmétiques.....	71
B)	Contraintes conditionnelles.....	73
C)	Contraintes constitutives.....	74
5.3.	Description du comportement.....	77
5.3.1.	Principes.....	77
5.3.2.	Calcul qualitatif.....	78
A)	Evaluation d'une contrainte arithmétique.....	78
B)	Evaluation d'une condition.....	83
C)	Ambiguïté.....	87
D)	Liste d'hypothèses pour l'évaluation d'une contrainte arithmétique.....	88
E)	Listes d'hypothèses pour l'évaluation d'une condition....	90
F)	Evaluation d'une liste de contraintes.....	92
5.3.3.	Construction des épisodes possibles.....	100
A)	Contraintes de valeurs imposées.....	100



B) Arbre et noeuds morts.....	100
C) Arbre d'évaluation des contraintes constitutives.....	101
D) S-description.....	102
5.3.4. Diagramme des épisodes.....	104
A) Paramètres d'état.....	104
B) Contraintes de continuité.....	106
C) Prédiction des valeurs des paramètres d'état.....	111
D) Arbres continu et noeuds morts.....	111
E) Définition du diagramme des épisodes.....	112
5.4 Raisonement causal.....	113
CHAP 6. Réalisation du simulateur qualitatif.....	115
6.1 Architecture du simulateur qualitatif.....	115
6.2 Module Construction-de-l'arbre-d'évaluation.....	116
6.3 Module Evaluation-des-contraintes-arithmétiques.....	116
6.4 Module Evaluation-somme.....	117
6.5 Module Evaluation-différence.....	118
6.6 Module Evaluation-produit.....	120
6.7 Module Evaluation-division.....	121
6.8 Module Evaluation-égal.....	122
6.9 Module Evaluation-moins.....	123
6.10 Module Evaluation-condition.....	125
6.11 Module Evaluation-condition-vraie.....	125
6.12 Module Evaluation-condition-fausse.....	126
6.13 Module Interrogation-d'une-S-description.....	126
6.14 Module Test-mgn-inférieur.....	127
6.15 Module Test-mgn-égal.....	128
6.16 Module Test-signe.....	128
6.17 Module Compatibilité-contraintes-imposées.....	129
6.18 Module Contraintes-continuité.....	130

CHAP 7. Conclusions.....	131
Bibliographie.....	134
Annexes.....	
A) Les graphes de liaisons.....	1
B) Les confluences du modèle du ventricule gauche.....	5
C) Tableau partiel des états qualitatifs du ventricule gauche....	7
D) Diagramme partiel des épisodes.....	8





## CHAP 0. INTRODUCTION

Historiquement, les premières applications informatiques étaient basées sur le traitement de masses de données, peu structurées et généralement numériques. Cependant, la volonté de confier à la machine des tâches de plus en plus complexes a débouché sur le développement de programmes manipulant des connaissances symboliques de haut niveau. Parmi ces connaissances, les systèmes experts actuels font largement usage de connaissances du jugement qui reflètent l'expérience et l'opinion d'un expert analysant une situation. Ces systèmes, par contre, ne font que très peu appel aux connaissances scientifiques ou théoriques fondamentales.

Les systèmes experts appliqués à la médecine, par exemple, n'utilisent qu'exceptionnellement des notions de biochimie ou de biophysique. De plus, ils sont généralement tout-à-fait ignorants des mécanismes de la physiologie. A l'occasion de notre mémoire nous nous sommes précisément intéressés au traitement de ce type de connaissances. Nous avons ainsi consacré notre étude au raisonnement automatique sur les systèmes physiques dynamiques.

Notre étude est cependant doublement limitée. D'une part nous nous sommes restreints à un type de raisonnement particulier : la prévision du comportement et son explication. Notre objectif n'est pas de développer un système complet, mais de simplement dégager un chemin. D'autre part tous les systèmes physiques ne sont pas concernés par notre étude. Les systèmes effectivement pris en compte sont les systèmes à paramètres continus et localisés, dont la topologie peut être exprimée sous la forme d'un graphe de liaison causal. ( cfr. l'annexe sur les graphes de liaison )

Nous nous sommes fixés pour objectif, la construction automatique de raisonnements sur les systèmes physiques. Ces raisonnements devront être compatibles autant que possible, avec le sens commun. Remarquons qu'une explication compatible avec le sens commun ne peut faire appel à des moyens de calcul externes, ni à des supports de mémoire. On ne peut faire appel qu'à des opérations logiques simples. Les valeurs numériques sont bien entendu exclues. On ne peut utiliser que des notions qualitatives telles que "plus grand que", "augmente", "constant"... Nous n'avons pas retenu "petit", "moyen", et "grand" car ces termes sont relatifs au contexte, et ne se prêtent pas au développement de méthodes générales d'interprétation. Pour qu'un raisonnement soit compatible avec le sens commun, il faut également qu'il soit causal, ou du moins qu'il adopte une forme causale. En effet, les êtres humains, lorsqu'ils raisonnent sur un dispositif physique, semblent comprendre son fonctionnement en termes de relations de cause à effet. Le modèle cognitif de l'être humain serait donc un modèle causal.

Le programme réalisant la prévision du comportement du dispositif physique en termes qualitatifs, est appelé "simulateur qualitatif". L'entrée de ce programme est constituée d'une description de la structure du système physique et d'une description du signal d'entrée. La sortie fournit une prévision qualitative de son comportement. Remarquons que l'ambiguïté de l'analyse qualitative peut déboucher sur plusieurs futurs possibles. Ceci constitue un problème auquel nous nous sommes efforcés d'apporter une solution lors du développement d'un tel programme.



## CHAP 1. MOTIVATIONS DU MEMOIRE

Nous présentons dans ce chapitre les problèmes qui ont motivés notre étude. Ces problèmes sont issus d'une part, des insuffisances actuelles des méthodes d'analyse des modèles mathématiques, et d'autre part, de la faiblesse des systèmes experts appliqués en médecine. Nous développons ci-dessous quelques-uns de ces problèmes.

### 1.1 LES MODELES MATHEMATIQUES

#### 1.1.1 LES MODELES MATHEMATIQUES: OUTILS PEDAGOGIQUES

Dans le cadre de l'enseignement, les modèles mathématiques constituent un outil fort utile. Par le biais de simulations numériques, les enseignants peuvent s'en servir pour exposer le fonctionnement d'un dispositif physique. Citons par exemple le système SIMCAI [7]; celui-ci se compose de deux logiciels:

- "PROF" qui permet à l'enseignant de développer une leçon; ceci consiste à définir les équations du modèle étudié ainsi qu'une arborescence d'écrans renfermant chacun une partie des connaissances de ce modèle et/ou des questions sur ce modèle.
- "STUD" qui a deux fonctions:
  - d'abord, exécuter les leçons développées par "PROF" en présentant à l'étudiant les connaissances du modèle sous forme d'une succession d'écrans;
  - ensuite, inviter l'étudiant à effectuer des expériences de simulation sur ce modèle.

SIMCAI est utilisé à l'UCL pour l'enseignement du fonctionnement du système cardiaque. Un tel système offre notamment les avantages suivants:

- l'écran que propose "STUD" à l'étudiant dépend des réponses que ce dernier aura fournies à l'écran précédent: si elles sont correctes, "STUD" pourra proposer à l'étudiant les écrans décrivant la suite du modèle; sinon, l'étudiant sera renvoyé à un écran précédent ou à un écran renfermant des informations complémentaires sur le sujet qu'il n'aura pas assimilé; ceci permet d'adapter le rythme de l'enseignement au rythme propre à l'étudiant;
- une fois la leçon terminée, "STUD" proposera à l'étudiant de réaliser un certain nombre d'expériences sous forme de simulations numériques; celles-ci permettront à l'étudiant de tester les connaissances qu'il vient d'acquérir en comparant ses raisonnements avec les résultats de la simulation; ceci constitue pour l'étudiant une première mise en pratique de ses connaissances qui contourne tous les problèmes que l'on rencontre lors d'une expérience pratique en laboratoire;



- les résultats numériques de la simulation sont présentés à l'étudiant sous forme d'une animation graphique, ce qui les rend plus directement compréhensible.

Les systèmes d'enseignement par simulation numérique offrent cependant les inconvénients suivants:

- la simulation numérique nécessite une connaissance complète du système: le simulateur ne peut fonctionner sans la valeur réelle des variables d'état du système;
- les résultats de la simulation numérique requièrent une interprétation ultérieure afin de reconnaître et classifier les événements importants dans le comportement du système: "les chiffres et les graphiques ne parlent pas d'eux-mêmes"; la présence d'un expert est donc toujours souhaitable auprès de l'étudiant afin de lui offrir toute la sémantique de la simulation.

Nous présentons ici le modèle sur lequel se base SIMCAI pour l'enseignement des mécanismes du ventricule gauche isolé car la plupart des exemples que nous donnerons aux chapitres 3 et suivants s'appuieront sur ce modèle. Celui-ci est composé des éléments suivants:

- un ventricule gauche;
- une aorte;
- une source de pression fournissant une pression constante à l'entrée du ventricule;
- une valve mitrale permettant de bloquer ou laisser passer un débit de sang entre la source de pression et l'aorte
- une valve aortique permettant de bloquer ou laisser passer un débit de sang entre le ventricule et l'aorte;
- un réseau systémique dans lequel l'aorte diffuse le sang qu'elle reçoit

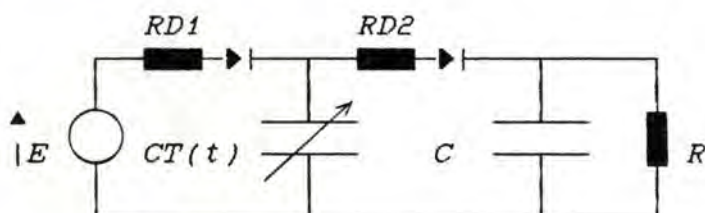
Ces divers éléments peuvent être modélisés sous forme d'un circuit électrique:

- le ventricule et l'aorte sont des sacs élastiques caractérisés par un volume et une pression; l'équivalent de ces sacs en électricité est une capacité; dès lors, on fait correspondre respectivement au ventricule et à l'aorte les capacités  $CT(t)$  et  $C$ ; remarquons que la capacité du ventricule dépend du temps car sa compliance change au cours de la systole;
- les valves aortiques et mitrales sont représentées respectivement par les diodes  $RD1$  et  $RD2$ ; en effet, les cas potentiels d'insuffisance d'une valve offre la possibilité de flux à travers la valve dans les deux sens (comme pour une diode); chacune de ces valves est donc caractérisée par une résistance passante ( $RD1(PA)$  et  $RD2(PA)$ ) et par une résistance blocante ( $RD1(BLO)$  et  $RD2(BLO)$ );



- la source de pression est modélisée par la source de tension  $E$ ;
- le réseau systémique constitue une résistance  $R$  à travers laquelle l'aorte doit faire passer le sang.

Les connexions entre les éléments du ventricule gauche isolé peuvent ainsi être représentées par le schéma électrique:



### 1.1.2. LES MODELES MATHEMATIQUES: OUTILS CLINIQUES

Jusqu'à présent, les modèles mathématiques n'ont été que d'un usage limité dans le développement d'outils d'aide à la décision clinique. L'intérêt des modèles mathématiques est leur capacité d'exprimer de façon concise des mécanismes fondamentaux de la physiologie. Ces modèles sont généralement exploités numériquement et une connaissance quantitative des paramètres de la physiologie leur est donc nécessaire. Or peu de processus physiologique se prêtent facilement à une description mathématique quantitative. Ceci explique le manque de succès actuel des modèles mathématiques en médecine.

Lorsqu'il s'agit d'un modèle de simulation, il est par exemple fondamental de connaître les valeurs numériques de chacune des variables d'état du système. Il faut donc être à même de les mesurer. Le traitement numérique des modèles nécessite l'existence de techniques de mesure précises et dont le coût soit acceptable par rapport au bénéfice thérapeutique que l'on peut en escompter.

Dans la pratique médicale, toutes ces conditions sont cependant rarement réunies. En effet, certaines mesures constituent une intervention majeure. Prenons le cas de la mesure de la pression au niveau de la crosse de l'aorte. Cette mesure est effectuée en amenant dans l'aorte un cathéter muni d'un capteur. Ce cathéter est introduit par l'artère fémorale!

Par ailleurs, quand bien même une technique de mesure existe, si sa précision n'est pas suffisante, il est alors hors de question d'exploiter la valeur mesurée au cours d'une analyse numérique. La qualité des résultats de cette analyse dépend en effet de l'exactitude des mesures effectuées. En outre, elle dépend de l'identification correcte des paramètres importants du modèle ainsi que de la précision des relations qui ont été établies entre ceux-ci.

C'est ce genre de problèmes qu'ont rencontrés H. Pouleur, C van Eyll, J Col, J. W. Covell et A. Charlier durant leurs travaux sur



le développement d'un système d'aide à la thérapie de l'infarctus aigu du myocarde [7]. L'objectif de leur système était de pouvoir évaluer les altérations des capacités des ventricules suite à une crise cardiaque, prévoir les changements hémodynamiques ainsi que les changements d'équilibre des fluides du corps humain et de simuler l'influence de différentes thérapies. Ce système se base sur un modèle de régulation cardiovasculaire déduit du modèle de Guyton. Le modèle de Guyton ne pouvait pas être utilisé tel quel car il ne fournissait pas de résultats suffisamment précis que pour pouvoir guider une thérapie. Le modèle de Guyton a donc dû être adapté. Il a également fallu quantifier ce modèle, par exemple évaluer l'influence des barorécepteurs, des récepteurs cardio-pulmonaires, etc...

Les limitations de ce système sont les limitations habituelles aux modèles mathématiques. L'identification des paramètres et des mécanismes fondamentaux peut mener à une trop grande simplification. Un certain nombre de mécanismes homéostatiques ont par exemple été négligés. Il faut espérer que ceux-ci ne contrecarreront pas les mécanismes effectivement pris en charge par le modèle. Par ailleurs, pour pouvoir déduire des résultats précis, il faut bien entendu disposer de mesures et de données les plus exactes possibles. Dans le cas du modèle de Guyton, le retour veineux est fonction du gradient entre la pression moyenne systémique et la pression de l'oreillette droite. Ce gradient est difficile à évaluer correctement car on connaît généralement mal le zéro hydrostatique et la pression moyenne intra-thoracique.

Ce type de limitation n'empêche cependant pas les modèles mathématiques de devenir des outils d'aide à la décision efficaces. Néanmoins nous pensons que l'exploitation optimale de ces modèles passe par le recours à de nouvelles techniques. Nous rejoignons ainsi l'opinion de E. Shortliffe, B. Buchanan et de E. Feigenbaum lorsqu'il écrivent: "Il existe une large communauté de chercheurs en mathématiques qui tentent de comprendre et de décrire les processus physiologiques par la construction de modèles de simulation. Bien que de tels modèles ( ... ) ne trouvent généralement pas d'application directe en médecine clinique, leur rôle de recherche pourrait finalement être étendu pour fournir une aide à la décision pratique par le biais d'interfaces avec d'autres paradigmes..." [10].

Nous mentionnons à titre d'exemple le système DIGITALIS THERAPY ADVISOR. Ce système était à l'origine basé sur un modèle mathématique de la pharmacocinétique des glucosides cardiaques. Il était très utile car il permettait une réduction considérable des réactions d'intolérance à la digitaline. Néanmoins ce programme a été étendu de manière à pouvoir tenir compte d'informations non-numériques qu'utilisent les experts lorsqu'ils établissent une thérapie. Ce système qui se prêtait déjà très bien à une description mathématique quantitative a ainsi tiré un très grand avantage des interactions avec les techniques de raisonnement symbolique.

Nous pensons que les modèles de simulation peuvent également tirer profit de techniques semblables pour constituer ainsi des outils d'aide à la décision efficaces. L'analyse numérique de ces modèles n'est pas toujours très satisfaisante. Dans certains cas, elle est même impossible. Dès lors, pourquoi ne pas chercher à



développer des techniques capables d'exploiter ces modèles, même si l'information numérique fait défaut ? Ceci justifie à notre avis l'effort que l'on peut consentir dans le développement de méthodes d'interprétation qualitative de modèles mathématiques.

## 1.2 LES SYSTEMES EXPERTS APPLIQUES EN MEDECINE

A l'heure actuelle, de nombreux systèmes experts appliqués en médecine ont déjà été développés. Néanmoins, peu d'entre eux ont quitté le cadre de la recherche ( recherche universitaire, bien souvent ) pour rejoindre le milieu hospitalier.

Parmi les systèmes effectivement utilisés dans la pratique médicale, on peut citer les systèmes PUFF, EXPERT-electrophoresis et ONCOCIN. La tâche de PUFF est d'interpréter des résultats de tests pulmonaires, et de produire une interprétation de ceux-ci ainsi qu'un diagnostic pour le patient. EXPERT-electrophoresis est utilisé dans l'analyse des protéines. C'est probablement le premier produit commercialement disponible ayant recours à des techniques d'I.A. en médecine. ONCOCIN est utilisé en oncologie. Il s'appuie sur une large base de données clinique pour émettre un pronostic dans le cas d'un cancer et proposer une thérapie. On peut éventuellement ajouter le système français DIABETO, accessible par Minitel. L'utilisation des autres systèmes est beaucoup plus marginale dans le milieu médical.

Cette faible pénétration des systèmes experts en milieu hospitalier ne s'explique que partiellement par les réticences psychologiques du corps médical et par les coûts financiers entraînés par cette technologie. Une autre raison est peut-être le manque de performance de tels systèmes.

Plusieurs systèmes ont été formellement évalués : CASNET, INTERNIST, MYCIN et PUFF. Le comportement de tels systèmes était jugé acceptable à 80 % ( Shortliffe et Clancey ).

Une faiblesse de ces systèmes communément admise est l'étroitesse de leur champ d'application et leur incapacité de détecter si un problème qui leur a été soumis ne se trouve pas en dehors de leur domaine d'expertise. Suivant De Kleer et Brown, cette faiblesse provient du fait que ces systèmes sont totalement dépourvus de "sens commun". Cette absence de sens commun pourrait partiellement être palliée par le recours au raisonnement qualitatif. Ceci est valable quelque soit le domaine d'expertise du S.E.

Une faiblesse particulière des S.E. appliqués en médecine est le manque de connaissances des mécanismes de la physiologie. Suivant Ramesh Patil, Peter Szolovitz et William Schwartz, "les connaissances sur les différentes maladies en médecine et leur pathophysiologie peut-être comprise à différents niveaux. Bien qu'il soit plus facile pour un programme de raisonner artificiellement sur des connaissances à un seul niveau de détail, nous devons être capable de raisonner à différents niveaux ( ... ) pour exploiter l'information médicale disponible" [8].



Pour l'instant, on est bien loin de pouvoir traiter tous les niveaux de connaissances. Suivant J. Ferber, "Dans les systèmes actuels, la connaissance est de type superficiel. Elle indique les dépendances qui relient les causes internes aux symptômes." Les systèmes experts actuels sont généralement incapables de travailler sur les mécanismes fondamentaux de la physiologie. Ceci constitue une faiblesse importante. L'organisme est le siège d'un grand nombre d'interactions qui peuvent modifier les symptômes. Il n'est pas évident que l'on puisse déduire les causes internes à partir des symptômes sans jamais faire appel à des raisonnements sur les notions fondamentales. De plus, suite aux interactions entre symptômes, ces systèmes peuvent être rendus inopératoires par la présence simultanée de plusieurs affections.

Permettre au S.E. de raisonner sur les mécanismes fondamentaux de la physiologie constitue un des défis de la prochaine décennie. Suivant Clancey et Shortliffe, "Il faut améliorer les techniques pour représenter et utiliser les relations causales et mécanistes, car le comportement d'un expert lorsqu'il élabore une décision dépend parfois plus de sa capacité de raisonner sur des principes premiers plutôt que de sa capacité de relier des observations et des hypothèses par le biais d'associations empiriques" [11].

Nous pensons que les modèles mathématiques développés par les experts en bio-engineering constituent une très bonne incarnation des mécanismes fondamentaux de la physiologie. Par conséquent, le développement de systèmes experts basés sur l'interprétation qualitative de modèles nous semble être un remède possible aux insuffisances des S.E. actuels.



## CHAP 2. RECHERCHE D'UNE SOLUTION

### 2.1 METHODE RETENUE : LA PHYSIQUE QUALITATIVE

Le chapitre précédent nous indique qu'il existe bien une opportunité pour le développement de techniques non-numériques d'interprétation de modèles. En effet, celles-ci pourraient servir d'outil de base à la construction automatique de raisonnements appliqués aux mécanismes de la physiologie. Etant donné que cette approche privilégie une vue mécaniste de la physiologie, nous pouvons en toute généralité travailler sur des "dispositifs physiques".

Avant d'entamer nos travaux, nous nous sommes tout d'abord documentés sur ce qui existe actuellement dans le domaine de l'interprétation automatique du comportement des dispositifs physiques. La physique qualitative a rapidement retenu notre attention. En effet, les objectifs de la physique qualitative semblent très bien correspondre à nos propres besoins. Par ailleurs, certaines applications récentes tentent à confirmer notre choix. Nous développerons ci-dessous nos motivations. Signalons que la physique qualitative est mentionnée dans la littérature sous plusieurs dénominations différentes : physique naïve, théorie qualitative des processus, etc.

Les objectifs de la physique qualitative ont très largement influencé notre choix. La physique qualitative se pose en effet les buts suivants :

- Etre beaucoup plus simple que la physique classique, mais néanmoins distinguer tous les éléments importants sans faire appel à la résolution d'équations différentielles, ni aux mathématiques des variables continues.
- Produire des compte-rendus de type causal et facile à comprendre des mécanismes physiques.
- Poser les bases pour les modèles du sens commun destinés à la prochaine génération de systèmes experts.

Si nous avons jeté notre dévolu sur la physique qualitative, c'est également parce que celle-ci a déjà été sélectionnée, à l'occasion de recherches en I.A. sur le raisonnement automatique appliqué en médecine. Kuipers et Kassirer se sont attachés à la construction automatique de raisonnements causaux sur des problèmes d'équilibre en physiologie [6]. Ils ont choisi comme terrain d'étude, l'analyse du syndrome néphrotique.

Deux processus d'équilibre interviennent dans le syndrome néphrotique. Le premier équilibre concerne le transfert de liquide ( eau + sel ) entre le plasma et les tissus au travers des parois des capillaires. Ce transfert dépend de l'équilibre entre la pression hydrostatique et oncotique ( la pression oncotique est en fait une pression osmotique entre solutions de protéines de concentrations différentes ). On appelle cet équilibre,



l'équilibre de Starling. Le second équilibre est contrôlé par les reins qui régulent le volume de fluide du corps humain. Si ceux-ci sécrètent des protéines (protéinurie), il s'en suit une perturbation de l'équilibre de Starling.

Kuipers et Kassirer ont tout d'abord observé des médecins raisonnant sur le syndrome néphrotique. Cette observation confirme l'hypothèse que le modèle cognitif des médecins, simulant le fonctionnement normal ou pathologique du corps humain, est un modèle causal. Ils se sont dès lors efforcés de représenter les connaissances spécifiques aux domaines, c'est-à-dire des connaissances des mécanismes de la physiologie, sous une forme capable de supporter le raisonnement causal. Ceci a débouché sur un modèle du métabolisme des reins et de l'équilibre de Starling. D'autre part, ils ont développé un simulateur qualitatif capable de prévoir le comportement de ce modèle. Les raisonnements générés par ce simulateur sont bien-entendu exprimés en termes qualitatifs tels que "augmente", "diminue", "plus petit que" etc. Les valeurs numériques sont exclues.

Nous relevons que la physique qualitative a également débouché sur une application concrète en ICAI (Intelligent Computer Aided Instruction). Il s'agit du projet STEAMER, utilisé par la Navy américaine dans l'enseignement de la propulsion par turbine à vapeur. La physique qualitative semble être très efficace dans l'enseignement du fonctionnement des systèmes dynamiques grâce à sa faculté de produire des raisonnements en accord avec l'intuition physique.

Nous avons bénéficié que d'une approche limitée de l'enseignement de la physiologie. Néanmoins cette approche nous laisse croire que la physique qualitative pourrait également très bien convenir pour l'enseignement de la physiologie assisté par ordinateur.

## 2.2 ALTERNATIVES

Notons que d'autres solutions auraient pu être envisagées. Nous pensons aux logiques modale, temporelle ou floue. Citons par exemple Zadeh qui cherche à modéliser le sens commun au travers de la logique floue, ou Mc Dermott qui veut créer une ossature logique pour raisonner dans le temps sur des événements, actions et plans d'actions...



## CHAP 3. LE POINT EN PHYSIQUE QUALITATIVE

### 3.1. INTRODUCTION

La physique qualitative est un domaine de l'intelligence artificielle extrêmement jeune qui regroupe les chercheurs concernés par le raisonnement automatisé sur le monde physique. Certains travaillent sur des dispositifs continus, d'autres sur des systèmes physiques discrets. Les recherches de ces derniers sont néanmoins en dehors de nos préoccupations: nous nous intéressons exclusivement aux systèmes continus. A l'heure actuelle, il n'existe pas encore de théorie unique ni de paradigme bien établi et reconnu par tous les chercheurs de ce domaine. Cependant, ils partagent une démarche commune basée sur les principes suivants:

- la description du comportement d'un système physique doit être dérivable de sa structure;
- la structure d'un système physique est définie par les composants de ce système, le comportement de ses composants et les connexions entre ses composants;
- le comportement des composants est défini par les changements observables dans l'état de ces composants;
- le comportement du système résulte de l'interaction au cours du temps des comportements des composants à travers les connexions spécifiées.

Par contre, ils n'utilisent pas les mêmes notations ni le même vocabulaire. De même, ils ne recourent pas à une méthode unique pour prédire et expliquer le comportement d'un mécanisme physique. Ainsi, il nous semble utile d'exposer différentes approches reconnues dans ce domaine.

Parmi les approches existantes, nous avons retenu celles de De Kleer & Brown, Forbus et Kuipers car ils s'intéressent, comme nous, à l'étude de systèmes continus. Notre approche personnelle étant basée sur leurs travaux, l'exposé succinct de ceux-ci nous a semblé nécessaire pour une bonne compréhension de ce document.



### 3.2 APPROCHE DE DE KLEER ET BROWN

Ce paragraphe fait la synthèse des principaux aspects de la physique qualitative élaborée par De Kleer et Brown [3]. Cette théorie se base sur le concept de confluence (équation différentielle qualitative) et le concept d'état qualitatif. Nous verrons comment ces concepts interviennent dans la modélisation de la structure d'un dispositif physique, et comment déduire le comportement de ce dispositif à partir de sa structure. Le dernier problème abordé dans ce paragraphe, et peut-être aussi le plus important, est celui de la construction des explications du comportement. On montrera qu'une preuve logique n'est pas satisfaisante et qu'on lui préfère un exposé causal. Il existe cependant un certain nombre d'obstacles à la causalité. Ces obstacles ont suggéré à De Kleer et Brown l'introduction de notions nouvelles telles que le temps et la causalité "mythique". Mais avant tout, nous commenceront par énoncer deux principes de cette démarche.

#### 3.2.1 DEUX PRINCIPES DE LA DEMARCHE

##### A) Principe de non-fonction dans la structure

Lorsque l'on modélise un dispositif physique avec l'intention de déduire son comportement à partir de sa structure, il est logique d'exclure durant sa modélisation, toute présupposition sur son comportement. Néanmoins, ceci est impossible à réaliser : lorsque l'on modélise le comportement d'un composant, on est amené à en isoler certains aspects importants qui dépendent du contexte de fonctionnement de celui-ci. On est donc obligé de faire des hypothèses. En électricité, on supposera par exemple que les dimensions du circuit sont beaucoup plus faibles que la plus grande longueur d'onde intéressante. En hydrolitique, on supposera que le libre parcours moyen des molécules est beaucoup plus faible que la distance sur laquelle s'exerce une différence de pression. On supposera que tous les écoulements sont laminaires, etc... Ces hypothèses ainsi formulées déterminent des classes parmi les dispositifs physiques qui nous permettent d'établir le principe de non-fonction dans la structure :

***" Lorsque l'on établit les lois d'un composant d'un dispositif physique appartenant à une classe déterminée, il est interdit de faire d'autres hypothèses sur le comportement de ce dispositif que celles définissant sa classe."***

Remarquons qu'il est important de pouvoir très clairement établir les hypothèses constitutives d'une classe, tout particulièrement dans le cas de S.E. dédiés au contrôle, à la conception ou au dépannage de dispositifs physiques complexes. C'est en effet l'analyse de ces hypothèses qui permettra l'établissement des raisons des comportements inattendus.



## B) Principe de localité

Une partie d'un dispositif physique ne peut agir que sur ses voisines immédiates et ne peut subir l'influence que de ses propres voisines.

### 3.2.2 MODELISATION DE LA STRUCTURE

#### A) Les constituants de la structure

En vertu du principe de localité, les parties du dispositif physique ne peuvent agir que sur leurs voisines immédiats, celles-ci étant identifiables a priori. Ce principe suggère de décomposer les dispositifs physiques en trois types de constituants de la manière suivante :

La matière : Cela peut être de l'électricité dans un circuit électrique, du sang dans le système cardio-vasculaire...

Les composants : Les composants sont les constituants qui ont la possibilité de changer la forme et les caractéristiques de la matière. Ceux-ci sont modélisés soit par un ensemble de lois formelles soit par un ensemble de composants interconnectés. exemple : une résistance électrique, un capillaire ...

Les conduits : Ces constituants ne font que transporter la matière d'un composant à l'autre sans effectuer la moindre transformation.

Notons que cette modélisation des dispositifs physiques convient très mal aux dispositifs à paramètres distribués car on demande de donner a priori les interactions possibles entre les composants du dispositif !

On peut considérer que chacun des composants du dispositif physique constitue un processeur d'information. Le comportement global du dispositif physique est alors le résultat des interactions causales entre ses composants adjacents. Quant aux lois de la physique, elles deviennent les propriétés des "programmes" exécutés par chacun des processeurs.

#### B) L'espace de quantité

L'objectif de la physique qualitative est de dégager les mêmes concepts que la physique classique ( feed-back, oscillation, équilibre... ) et de pouvoir décrire le comportement d'un dispositif physique, mais cette fois en se fondant sur des bases beaucoup plus simples que la physique classique, ces bases étant néanmoins formelles.

Le premier pas consiste à réduire la précision de l'analyse quantitative. Dans cette optique, toutes les approches de la physique qualitative tentent de décrire l'espace continu des variables au moyen d'un ensemble discret de symboles.



Suivant Hayes ( Manifeste de la physique qualitative ), on appelle cette représentation discrète d'un espace continu, un "espace de quantité".

L'approche de De Kleer & Brown consiste à remplacer l'espace continu par un ensemble restreint de valeurs. A chaque une de ces valeurs correspond un intervalle ( un point ) de la droite des réels. On impose que ces intervalles soient disjoints et que leur réunion forme la droite des réels. On choisit bien sûr ces valeurs de manière à perdre le moins d'informations possible. Un choix judicieux reprend par exemple les singularités, les discontinuités... Cependant De Kleer et Brown limitent leur espace de quantité à 0, + et - . On constate en effet que cet espace de quantité est très universel. Supposons que A constitue un seuil pour la variable x . Il suffit d'introduire la variable y valant (x - a) pour que cet espace reste suffisant.

De Kleer et Brown représentent les valeurs qualitatives des variables au moyen des notations suivantes :

$$\begin{aligned} [x] &= + \text{ si } x > 0 \\ [x] &= 0 \text{ si } x = 0 \\ [x] &= - \text{ si } x < 0 \end{aligned}$$

Et d'une manière plus générale :  $[x]_Q$  représente la valeur qualitative de la variable x dans l'espace de quantité Q.

Quant aux valeurs qualitatives des dérivées, celles-ci sont notées de cette manière :

$$\begin{aligned} [dx/dt] &= \partial x \\ [d^n x/dt^n] &= \partial^n x \end{aligned}$$

- Remarques :
1. Il ne faut pas perdre de vue qu'il existe d'autres manières de construire un espace de quantités.
  2. L'usage des espaces de quantité a pour effet secondaire d'introduire de l'ambiguïté dans l'analyse. Ceci n'est pas nécessairement mauvais, car l'ambiguïté est une des propriétés du raisonnement qualitatif.

### C) Le calcul qualitatif

Après avoir défini la valeur qualitative d'une variable, on va tout naturellement définir une "addition" et une "multiplication" sur ces valeurs ;

1.  $[x] + [y]$

[x]		-	0	+
[y]				
-		-	-	
0		-	0	+
+			+	+

2.  $[x] * [y]$

[x]		-	0	+
[y]				
-		+	0	-
0		0	0	0
+		-	0	+



Il faut souligner que l'addition n'est pas partout définie. On n'a même pas un groupe algébrique! Pour pouvoir déterminer  $[x] + [y]$  lorsque  $[x] = -$  et  $[y] = +$ , il faut de l'information supplémentaire concernant les grandeurs relatives de  $x$  et  $y$ , mais ceci exige un espace de quantité plus riche (cfr Forbus) et également des mécanismes d'inférence beaucoup plus sophistiqués.

Nous proposerons une approche personnelle pour résoudre ce problème.

Nous avons constaté qu'il était possible d'établir une "algèbre qualitative". Il est également possible d'écrire une version qualitative de la continuité, du théorème de la valeur moyenne, du théorème de Rolle, etc.

- Continuité :

Soit deux instants  $T_1$  et  $T_2$ ,  $T_1 < T_2$   
 Si  $[x(T_1)]_Q = A_K$   
 $[x(T_2)]_Q = A_m$ ,  $A_K < A_m$   
 Alors pour toute valeur qualitative  $A_n$   
 tel que  $A_K < A_n < A_m$ ,  
 Il existe un instant  $T$  tel que  $T_1 < T < T_2$   
 et  $[x(T)]_Q = A_n$ .

- Théorème de Rolle :

Si  $[x(T_1)]_Q = [x(T_2)]_Q$   
 Alors il existe un instant  $T_i$  tel que  
 $T_1 \leq T_i \leq T_2$  et  $\partial x(T_i) = 0$ .

- Théorème de la valeur moyenne :

Si  $[x(T_1)]_Q = A_K$  et  $[x(T_2)]_Q = A_m$ ,  
 Alors il existe  $T_i$  tel que  $T_1 \leq T_i \leq T_2$   
 et  $\partial x(T_i) = [x(T_2)]_Q - [x(T_1)]_Q$

Bien que ces théorèmes soient mal établis dans ce contexte, en particulier lorsque le temps est discrétisé, ceux-ci constituent néanmoins pour De Kleer et Brown, la base du raisonnement qualitatif.

## D) Modélisation des constituants

Pour pouvoir modéliser le comportement des composants d'un dispositif physique, De Kleer et Brown ont introduit les concepts fondamentaux de **confluence** et d'**état qualitatif**. La description du comportement est en effet obtenue à partir de ces concepts. On pourra constater que ces concepts sont beaucoup plus simples que ceux de la physique classique, ce qui correspond bien aux objectifs de la physique qualitative.

### 1. Les états qualitatifs :

Les états qualitatifs servent à diviser le comportement des composants en sous régions. Ces régions sont définies par des inégalités ( égalités ) entre des variables du composant ou entre des variables et des constantes symboliques. ( remarque importante : les dérivées ou les intégrales de variables ne sont pas admises. )



## 2. Les confluences :

A l'intérieur d'un état, le comportement d'un composant est modélisé au moyen d'un set de confluences. Chaque confluence est constitué d'une somme de termes valant une constante :

$$\sum_i T_i = Cst$$

Un terme est constitué soit d'une variable, de la négation d'une variable ou du produit d'une constante et d'une variable.

Une confluence est satisfaite par un ensemble de valeurs si :

1. On peut assigner une valeur à chaque terme ;
2. Soit l'évaluation de la somme de termes fournit strictement Cst ;

Soit l'évaluation de la somme de termes n'est pas possibles ( On se souviendra que l'addition n'est pas partout définie. )

Une confluence est contredite par un ensemble de valeurs si :

1. On peut assigner une valeur à chaque terme ;
2. La confluence n'est pas satisfaite .

On remarquera au passage qu'une confluence peut être simultanément ni satisfaite, ni contredite.

Les confluences peuvent être classées en confluences "pures" et confluences "mixtes" ( L'intérêt de cette distinction apparaîtra plus loin dans le texte ). Les confluences "pures" sont les confluences dont tous les termes sont des variables, et les autres sont donc appelées "mixtes". On constate cependant qu'il y a moyen de transformer un set de confluences mixtes décrivant le comportement d'un composant en set de confluences pures. Il faut néanmoins introduire des états qualitatifs supplémentaires.

## 3. Comment établir les confluences d'un composant?

Bien que les confluences puissent être directement dérivées du sens commun, elles sont généralement déduites des équations de la physique classique au moyen des règles suivantes :

$$\begin{aligned}[e_1 + e_2] &\Rightarrow [e_1] + [e_2] \\ [e_1 * e_2] &\Rightarrow [e_1] * [e_2] \\ [0] + [e] &\Rightarrow [e] \\ [0] * [e] &\Rightarrow [0] \\ [+] * [e] &\Rightarrow [e] \\ [-] * [e] &\Rightarrow -[e]\end{aligned}$$



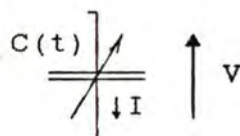
Une autre manière de voir les choses est de considérer que l'on réalise un développement de Taylor limité au premier ordre

$$\sum_i g_i \frac{dx_i}{dt} = g_o$$

avec  $g_o$  représentant la contribution des dérivées d'ordre supérieur.

#### 4. Exemple de modélisation de composants

Modélisation d'un condensateur variable.



Soient  $Q$  la charge du condensateur,  
 $C(t)$ , la capacité ( variable ) du condensateur,  
 (  $C(t) > 0$  )  
 $V$ , la différence de potentiels aux bornes du  
 condensateur,  
 $I$ , le courant passant dans le condensateur ;

On a en électricité l'équation suivante :

$$Q = C(t) V$$

Si on dérive cette équation on obtient :

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dC(t)}{dt} V + C(t) \frac{dV}{dt}$$

Par définition on a également l'équation suivante :

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

Si on utilise les règles de transformation, on peut facilement en déduire les confluences correspondant à ces trois équations :

1.  $[Q] = [C(t)] * [V]$   
 $= [+] * [V] = [V]$
2.  $\partial Q = \partial C * [V] + [C] * \partial V$   
 $= \partial C * [V] + \partial V$
3.  $\partial Q = [I]$

On constate que les deux dernières confluences sont mixtes. Pour obtenir des confluences pures nous allons introduire neuf états qualitatifs.

1. AUGMENTE+  
 $[V > 0] \text{ et } [I > 0] \Rightarrow \{ [Q] = + ; \partial C + \partial V = + ; \partial Q = + \}$
2. STABLE+  
 $[V > 0] \text{ et } [I = 0] \Rightarrow \{ [Q] = + ; \partial C + \partial V = 0 ; \partial Q = 0 \}$
3. DIMINUE+  
 $[V > 0] \text{ et } [I < 0] \Rightarrow \{ [Q] = + ; \partial C + \partial V = - ; \partial Q = - \}$
4. AUGMENTEO  
 $[V = 0] \text{ et } [I > 0] \Rightarrow \{ [Q] = 0 ; \partial V = + ; \partial Q = + \}$
5. etc...

### E) Les lois de connexion

La dynamique des systèmes impose deux conditions : une condition sur les variables de type "flux" et une sur les variables de type "pression". Il s'agit des conditions de continuité et de compatibilité que l'on appelle encore lois de connexion.

- **Condition de continuité** : Cette condition exprime l'idée que si de la "matière" (supposée incompressible) rentre par une extrémité d'un conduit, elle doit nécessairement ressortir par les autres extrémités. Cette condition se dénomme de différentes façons. En électricité on l'appelle loi de Kirchhof sur les courants. ( La somme des courants en un noeud est nulle. ) En hydrolique, cette condition correspond à la loi de conservation de la matière.

- **Condition de compatibilité** : De nombreux dispositifs physiques contiennent des boucles structurelles. Pour ces dispositifs, la condition de compatibilité demande que quelque soit le chemin choisi pour aller d'un point à un autre, la somme des variables de type "pression" soit identique. En électricité, on appelle cette condition, la loi de Kirchhof sur les tensions.

Etant donné que les lois de connexion ne sont constituées que de simples sommes, leur transformation en confluences ne pose absolument aucun problème.

Exemple : Suivant la loi de Kirchhof sur les courants, la somme des courants en un noeud est nulle.

Soit  $I_{ij}$  le courant passant du noeud  $i$  au noeud  $j$  ;

$$\sum_i I_{ij} = 0 \Rightarrow \sum_i [I_{ij}] = 0 \text{ et } \sum_i \partial I_{ij} = 0$$

A titre d'exemple, nous avons reproduit dans l'annexe, l'ensemble des confluences du modèle du ventricule gauche isolé.



Remarque : Il n'est pas bien difficile d'écrire les équations d'un système lorsque l'on dispose de sa structure. Néanmoins, si l'on prend l'ensemble des équations obtenues à partir des équations des composants et des lois de connexion, on constate que celui-ci est généralement très redondant. Si en mathématique il existe des techniques pour extraire d'un ensemble d'équations, un ensemble d'équations équivalent mais non-redondant, ce n'est hélas pas le cas pour les confluences de la physique qualitative de De Kleer et Brown. Cette situation leur pose d'ailleurs des problèmes; par exemple, la détection de feed-backs là où il n'y en a pas etc...

### 3.2.3 PREDICTION DU COMPORTEMENT

#### A) Introduction

Nous avons vu dans le paragraphe précédent, une technique de modélisation du comportement des composants individuels d'un dispositif physique. La modélisation de sa structure a également été envisagée. Ceci étant fait, nous allons présenter une méthode de prédiction du comportement du dispositif se basant sur cette modélisation particulière. De Kleer et Brown ont baptisé cette méthode "envisionnement". Il ne s'agit absolument pas d'une simulation qualitative. En effet, contrairement à la simulation qualitative, l'envisonnement décrit simultanément le comportement du dispositif sous toutes les conditions initiales possibles. Les conditions initiales ne servent qu'après coup pour déterminer les transitions possibles. L'algorithme sera décrit par la suite, mais avant cela, il est nécessaire d'introduire un nouveau concept : les épisodes.

#### B) Les épisodes

De Kleer et Brown ont découpé le temps en intervalles que l'on appelle des épisodes. Il peut paraître surprenant de s'occuper aussi tardivement de la représentation du temps. Cela provient du fait que l'on ne peut pas d'emblée quantifier le temps comme on peut le faire avec l'espace continu des variables du dispositif. En effet la quantification du temps dépend de l'analyse des confluences. On définit un **épisode** comme étant un intervalle de temps durant lequel ne changent ni les états qualitatifs, ni la valeur qualitative des variables, ni la valeur des dérivées qualitatives.

#### C) Les états composites d'un dispositif

Les états composites possibles d'un dispositif sont inclus dans le produit cartésien des états qualitatifs des composants individuels de celui-ci. En effet pour qu'un état composite possible soit accepté, il doit satisfaire la **règle de non-contradiction**. On dit qu'il y a contradiction si soit il existe deux composants tel que leurs états qualitatifs ne peuvent exister simultanément, soit s'il est impossible de satisfaire l'ensemble des confluences.



Pour illustrer ceci, reprenons notre exemple. Le Tableau suivant reprend les composants du circuit étudié ainsi que leurs nombre d'états qualitatifs possibles.

composant	type	nbr. d'états qualitatifs
RD1	diode	2
RD2	diode	2
CT	condensateur- variable	9
C	condensateur	3
R	résistance	1

On en déduit facilement que le nombre d'états composites candidats ( $2 * 2 * 9 * 1$ ) vaut 108. Néanmoins tous ces états composites candidats ne sont pas valables. Il est par exemple impossible d'avoir simultanément d'une part RD1 et RD2 dans l'état "BLOQUÉ" et d'autre part VG dans un état différent de "STABLE+", "STABLEO" ou "STABLE-". Il n'y aura jamais moyen de satisfaire la confluence exprimant la condition de continuité au conduit C1 (loi de Kirchhof sur les courants). En vertu de la règle de non-contradiction, ces états seront bien-entendu écartés.

#### D) Description de l'algorithme d'envisonnement

##### 1.) Les entrées-sorties

L'entrée de cet algorithme est constituée de l'ensemble des spécifications des états des composants individuels, des confluences qui caractérisent leur comportement dans chacun de leur état ainsi que des confluences exprimant les lois de connexion.

La sortie de cet algorithme fournit l'information nécessaire à la construction du diagramme d'état, c'est-à-dire l'ensemble des états possibles du dispositif, l'ensemble des transitions entre états et l'ensemble des résolutions des confluences pour chaque état. Par la suite seront appelés "*interprétation*" les valeurs satisfaisant un ensemble de confluences. On peut également adapter cet algorithme pour le diagramme étendu des épisodes. Dans ce cas on s'intéresse également aux transitions entre épisodes. On peut trouver dans un même état, plusieurs épisodes subséquents.



## 2.) Schéma de l'algorithme

- On détermine l'ensemble des états composites candidats du dispositif en considérant toutes les combinaisons d'états qualitatifs des composants individuels ;
- Pour tout S, élément de l'ensemble des états composites candidats du dispositif :
  - {
  - On vérifie s'il n'y a pas de contradiction dans les spécifications de S ;
  - S'il existe une contradiction, alors { on supprime S ; Exit }
  - On détermine l'ensemble des confluences de l'état composite S ;
  - On détermine I, l'ensemble des interprétations de l'état composite considéré S ;
  - Si  $I = \{\}$ , alors { On supprime l'état S ; Exit }
  - }
- Pour tout épisode correspondant à une interprétation d'un des états composites possibles :
  - {
  - déterminer l'ensemble des épisodes subséquents possibles (internes et externes à l'état) ;
  - }

## 3.) Résolution des confluences

Lorsque l'on veut déterminer les ensembles de valeurs satisfaisant les confluences, on se trouve en fait confronté avec un problème de satisfaction de contraintes. Une confluence constitue donc une contrainte pour ses variables. La méthode de satisfaction de contraintes utilisée par De Kleer et Brown est en fait une combinaison de la méthode de propagation des contraintes et du "Generate and Test". Nous avons tenté de reconstituer cet algorithme en nous basant sur la description fournie par De Kleer et Brown.

Programme :

- {
- Soit V-init, un ensemble de variables ;  
On initialise V-init avec l'ensemble des variables connues ;
- Soit I, un ensemble d'interprétations pour les confluences considérées ;  
 $I := \{\}$  ;
- Propagation-Génération ( V-init ) ;
- }

Propagation-Génération ( V ) :

```

{
  • Vérifier si aucune contrainte n'est contredite par
    les valeurs des variables de V ;

  • Si il y a contradiction Alors Terminé ;

  Sinon
  {
    • Trouver v, une variable à laquelle on a pas encore
      assigné de valeur ;

    • Si on a trouvé v
      alors pour tout val  $\in \{ -, 0, + \}$  :
      {
        • assigner val à la variable v ;

        • Propagation-génération ( V U {v} ) ;
      }
    sinon
    {
      Les valeurs des variables de V
      déterminent une (nouvelle)
      interprétation i ;

      I := I U {i} ;
    }
  }
}

```

### E) Règles de construction des diagrammes

Si l'on veut déterminer à partir des différentes interprétations, les transitions entre états ou entre épisodes, on a un certain nombre de règles à respecter:

**Règle de causalité:** Un composant ne peut changer d'état s'il n'est soumis à aucune action.

**Règle de la valeur moyenne:**

Pour toute variable X :  $[X(T')] = [X(T)] + \partial X(T)$  ;

**Règle de la limite:** Un état ne peut se terminer que si une de ses variables se dirige vers une des limites de l'état.

**Règle d'ordonnement:** Soit  $\partial X = +$  ; Supposons qu'il existe un changement d'état pour le composant E si la condition  $X < M$  n'est plus satisfaite et de même pour le composant F si la condition  $X < N$  n'est plus remplie. Si on a  $M < N$ , alors le composant F ne peut changer d'état avant le composant E.

**Règle du changement à l'égalité:** Si  $[X(T)] = A$  avec A représentant un point dans R et si  $\partial X(T)$  est différent de 0, alors le changement de X est immédiat.



**Règle de l'ordonnement epsilon:** Si  $[X(T)]$  quitte 0 et  $[Y(T)]$  se dirige vers 0, alors le changement de X se fait avant Y.

Et on peut encore éventuellement ajouter:

**Règle de continuité:** Si T et T' sont adjacents, alors  $[X(T)]$  est adjacent à  $[X(T')]$  et  $\partial X(T)$  adjacent à  $\partial X(T')$ .

#### F) Utilisation du diagramme d'états

Les diagrammes d'états ( ainsi que les diagrammes étendus des épisodes ) fournissent une description complète des modes de comportement que peut adopter le dispositif dont on a modélisé la structure. En effet ces diagrammes fournissent tous les comportements d'état à état ( d'épisode à épisode ) possibles. Ils sont donc très utiles pour répondre à des questions du type :

" Qu'est ce qui peut se passer lorsque l'on se trouve dans telle situation ? ", " Est-ce que telle situation est bien possible ? ", etc...

Cependant il est possible d'en retirer bien d'avantage. Par exemple, il est possible de se servir de ces diagrammes pour mettre en évidence des phénomènes d'oscillation, de cyclage, des états d'équilibre...

Nous avons, à titre d'illustration, joint dans notre annexe un tableau partiel des états qualitatifs ainsi qu'un diagramme partiel des épisodes du modèle du ventricule gauche isolé. Remarquons que le nombre élevé d'états qualitatifs différents de cet exemple nous empêche de le traiter dans son entièreté.

### 3.2.4 EXPLICATION DU COMPORTEMENT

Dans ce paragraphe, nous abordons un des problèmes clés de la physique qualitative : comment expliquer le comportement d'un dispositif physique? Il ne suffit pas de pouvoir énoncer tous les modes de comportement que peut adopter un dispositif pour en expliquer le fonctionnement. Il faut encore pouvoir exprimer comment ceux-ci se réalisent. Nous verrons qu'il existe plusieurs solutions plus ou moins compatibles avec notre intuition physique. Mais avant tout, nous commençons par faire une distinction entre le comportement inter-états et le comportement intra-état (i.e. le comportement à l'intérieur d'un état qualitatif). En effet ces deux classes de comportement ne posent pas du tout les mêmes problèmes.

#### A) Explication du comportement inter-états

L'explication du comportement inter-états est assez immédiate. Les diagrammes d'états ainsi que les spécifications d'états fournissent presque directement une explication causale des transitions d'états. S'il y a eu un changement d'état c'est parce qu'une ou plusieurs variables ont atteint une limite. Les



variations de ces variables constituent donc la cause du changement. Remarquons que ces variations sont bien antérieures au changement d'état ( la cause précède l'effet ). Il faut également pouvoir justifier les variations de ces variables, mais ceci fait partie de l'explication du comportement à l'intérieur d'un état.

## B) Explication du comportement intra-état

Construire une explication du comportement d'un dispositif à l'intérieur d'un état n'est pas une tâche évidente. On voudrait bien sûr que ces explications soient vérifiables, convaincantes et de préférence succinctes.

La première solution que nous allons envisager est la construction d'une preuve logique du comportement, mais cette solution n'est pas très satisfaisante comme on pourra le constater. On essayera par la suite de pallier aux défauts de cette solution.

### 1.) La preuve logique en tant qu'explication du comportement

Dans cette optique, la prédiction est le théorème à démontrer, et la démonstration de ce théorème, l'explication de cette prédiction. Une démonstration est composée d'une séquence d'affirmations. Une affirmation est justifiée uniquement au moyen d'inférences simples sur les affirmations qui la précèdent.

Ces inférences simples fournissent deux types de justification: "étant donné que", lorsque l'affirmation est une confluence du système ou l'expression d'une excitation externe, et "par substitution de  $v_i \dots v_n$  dans  $m$ ", lorsque l'affirmation est obtenue en substituant  $v_i \dots v_n$  dans l'affirmation  $m$ .

Or, il arrive que pour pouvoir poursuivre un raisonnement, on soit obligé de faire une hypothèse sur la valeur d'une variable. L'introduction d'une hypothèse peut cependant mener à une contradiction. Il faut dès lors être capable de la détecter. Il faut en outre pouvoir confirmer une hypothèse si sa négation mène à une contradiction. On réalise ainsi un raisonnement par l'absurde. Pour pouvoir réaliser tout ceci, il faut que soit également présent le type d'inférence "valeur-unique", dérivé de l'axiomatisation de l'égalité: toute variable ne peut avoir qu'une et une seule valeur. Si on obtient à un moment donné deux valeurs différentes pour une même variable, on débouche sur une contradiction qui infirme par la même occasion l'hypothèse précédemment formulée. Pour qu'une démonstration soit complète, il faut que toutes les hypothèses soient finalement confirmées. Or ce n'est pas toujours le cas. Dès lors l'analyse qualitative peut être ambiguë et il est alors possible de construire plusieurs démonstrations syntaxiquement valides.

Suivant De Kleer et Brown, il y aurait deux raisons à l'introduction d'hypothèses. La première: le comportement d'un dispositif peut être globalement ambigu. Il n'est alors pas possible de confirmer ou d'infirmer certaines hypothèses. La seconde: le système peut être localement ambigu et l'introduction du raisonnement par l'absurde n'est qu'une construction temporaire



pour permettre la poursuite du raisonnement.

Le type d'explication que nous venons de décrire n'est cependant pas très satisfaisant. Un certain nombre de critiques ont d'ailleurs été formulées. L'une d'elles concerne l'arbitraire dans l'introduction des hypothèses. Chaque choix peut éventuellement produire une explication valide d'un comportement différent. Cette situation provient en partie de la redondance des confluences, mais surtout de l'arbitraire du choix des hypothèses. Par ailleurs, le recours aux hypothèses rend nécessaire le raisonnement par l'absurde. De Kleer et Brown estiment que ce type de raisonnement n'est pas très en accord avec l'intuition physique car il est contraire au principe de localité des interactions. Par ailleurs, pour expliquer le comportement d'un dispositif physique, on fait références à des comportements hypothétiques qui ne se manifesteront jamais.

Si on juge les preuves logiques contraires à l'intuition, c'est surtout parce que celles-ci ne prennent pas en compte la notion de causalité. Intuitivement, le comportement d'un dispositif physique semble être le résultat d'une suite d'interactions causales entre composants voisins. Nous remarquerons que la preuve logique ne remplit aucun des critères de la causalité. Tout d'abord, l'introduction d'hypothèses arbitraires est contraire au principe de localité des interactions. Ensuite, la preuve logique n'établit aucun ordonnancement temporel dans l'affectation des valeurs aux variables alors que dans un raisonnement causal, la cause précède toujours l'effet. On peut encore ajouter la multiplicité des preuves logiques pour justifier l'affectation d'une valeur à une variable. Un effet n'a jamais qu'une cause.

Puisque l'objectif de De Kleer et Brown n'est pas de simplement de prouver qu'un certain comportement est admissible pour un dispositif donné, mais également d'exprimer comment ce comportement est réalisé, ils ont donc cherché à développer la notion de causalité dans un cadre qualitatif, de manière à pouvoir construire automatiquement des explications de type causal.

## 2.1) Les exposés causaux en tant qu'explication

La causalité apparaît comme un mode de raisonnement universel pour exprimer le fonctionnement des dispositifs physiques. Elle convient particulièrement pour comprendre le fonctionnement des dispositifs physiques, mais également pour l'expliquer et l'enseigner. Cependant la construction automatique des exposés causaux n'est pas évidente du tout. Il existe deux obstacles à la causalité. Le premier, c'est la forme acausale des lois de la physique. Le second : l'impossibilité d'éviter le raisonnement par l'absurde.

### La forme acausale des lois de la physique

En physique moderne, on réalise souvent ce que l'on appelle une approximation quasi-statique. On présuppose que durant son évolution, l'état du dispositif est toujours infiniment proche de son état d'équilibre. Si l'on regarde de plus près, on passe bien sûr par une série d'états intermédiaires de non-équilibre, sinon



le dispositif ne pourrait jamais changer d'état! Cependant cela n'apparaît pas dans les équations du dispositif ; il est donc impossible, par principe, d'en déduire un exposé causal.

Prenons par exemple l'équation bien connue en électricité :  $Q = C * V$  ( La charge d'un condensateur égale le produit de sa capacité et de la différence de potentiel appliquée à ses bornes ). Cette équation signifie que si la tension varie aux bornes du condensateur, il y aura simultanément une variation proportionnelle de sa charge. Il est impossible d'établir une relation de cause à effet car cela supposerait un ordonnancement temporel entre la variation de charge et la variation de la tension.

### Le recours au raisonnement par l'absurde.

La génération automatique des comptes rendus de type causal se base sur l'idée suivante : on associe à chaque composant un processeur d'information. Chaque processeur n'a qu'une capacité limitée de traiter ou de stocker de l'information. Il est programmé pour satisfaire les confluences du composant. Un processeur ne peut communiquer qu'avec ses voisins immédiats; il agit sur eux et ceux-ci agiront à leur tour sur leurs propres voisins. Pour une perturbation donnée, un processeur ne peut contribuer qu'une seule fois à l'établissement du comportement. Comme le comportement du dispositif est le résultat des interactions entre composants, la génération du compte rendu "causal" se fait en réalisant le relevé des interactions qui se sont produites entre les processeurs.

Il existe des dispositifs physiques dont il est impossible d'exprimer le comportement si on programme les processeurs associés aux composants tel que décrit précédemment. De Kleer et Brown montre que si l'on prend par exemple deux capillaires montés en série, alors il est impossible de rendre compte de leur comportement sans faire appel au raisonnement par l'absurde. Par ailleurs, raffiner la description des capillaires, soit en les découpant en une suite de capillaires très minces, soit en tenant compte de la quantité de mouvement du fluide dans ceux-ci, tout cela n'est d'aucune utilité. La première proposition complique encore d'avantage la situation. La seconde introduit des états, des transitions d'états et des comportements qui ne sont d'aucun intérêt par rapport au niveau de description original.

### Causalité et temps mythique.

Afin de pouvoir construire un raisonnement de type causal malgré l'acausalité de la forme des lois physiques, De Kleer et Brown ont introduit les concepts de temps et de causalité mythique. Ceux-ci sont destinés à décrire les états de non-équilibre que traverse un dispositif avant d'atteindre son nouvel état d'équilibre. Durant un temps mythique, les lois des composants peuvent être violées, mais à l'issue de celui-ci, toutes les lois doivent à nouveau être respectées ( En fait, c'est précisément la violation des lois qui permet le changement d'état! ). Un temps mythique a bien entendu une durée nulle par rapport au temps physique. Le temps mythique sert en fait à



résumer d'une manière causale, toutes les actions qui se déroulent durant un intervalle de temps que l'on juge négligeable au niveau du "grain de définition" de l'analyse. Prenons un capillaire. A une certaine échelle de définition, on peut considérer nul le temps nécessaire à l'établissement d'une différence de pressions à ses extrémités. Cependant, si on regarde plus finement ce qui se passe, on observera la transmission et la réflexion d'ondes de pression. Mais ce phénomène peut être d'aucun intérêt au niveau de l'analyse choisie.

### Le traitement de la causalité

L'architecture proposée précédemment ne permettait pas de générer des comptes rendus de type causal. Pour contourner le problème de la forme acausale des équations de la physique, on a introduit la notion de causalité mythique. On va maintenant enrichir l'architecture des processeurs incarnant les lois des composants et proposer des heuristiques appelées heuristique de canonicité, dans le but de faire apparaître la causalité dans les raisonnements.

Tout comme dans l'architecture précédente, les processeurs sont programmés pour satisfaire les confluences. Cependant, dans ce cas-ci, ils sont capables de distinguer les anciennes valeurs d'équilibre des nouvelles (elles peuvent être identiques). Par ailleurs, pour une perturbation donnée, une variable ne peut changer de valeur qu'une seule fois. Il en résulte que l'ensemble des nouvelles valeurs ne peut que croître d'une manière monotone. Cette manière de procéder permet de définir trois régions : une région où les processeurs ont tous leurs nouvelles valeurs, une "frange" où un nouvel équilibre est en train de s'établir, et une région qui n'a pas encore été atteinte par la perturbation. Intuitivement, la perturbation se déplace un peu comme une vague. Les composants sur le "front de la vague" imposent les nouvelles valeurs d'équilibre, en se basant sur les valeurs qui viennent d'être établies.

Cette approche n'empêche cependant pas les processeurs se trouvant sur la frange de se retrouver tous bloqués. Il est alors nécessaire de faire des hypothèses. De Kleer et Brown vont autoriser le raisonnement par l'absurde, mais sous une forme très limitée. Un processeur n'a le droit de faire des hypothèses qu'à deux conditions. Primo : il doit être à l'intérieur de la frange, c'est à dire qu'il a encore toujours une ancienne valeur d'équilibre et cette valeur est reliée par une confluence à des nouvelles. Secundo : tous les autres processeurs de la frange sont bloqués.

Lorsqu'un processeur fait des hypothèses, il ne les fait cependant pas complètement au hasard. Il va utiliser des heuristiques pour "bien deviner". Ces heuristiques ont été tirées de l'observation des types d'arguments que les humains utilisent dans leurs raisonnements sur les dispositifs physiques. De Kleer et Brown prétendent que les explications générées par ordinateur au moyen de ces heuristiques correspondent à celles que les experts humains préfèrent car elles expriment bien les caractéristiques de la causalité.



**Heuristique des composants:** Si on "pousse" ou "tire" sur l'extrémité d'un composant et que les autres actions sur ce composant sont inconnues, alors le composant réagit comme si celles-ci étaient négligeables.

**Heuristique des conduits:** Si on "suce" ( "force" ) de la matière dans un conduit, la variable de type "pression" diminue ( augmente ).

**Heuristique des confluences:** Si toutes les variables d'une confluence ne sont pas connues, on fait comme si toutes ces variables étaient nulles sauf une. Cette heuristique ne s'applique cependant pas aux conditions de continuité et de compatibilité.

On constate que ces heuristiques marchent fort bien dans la pratique. Néanmoins, De Kleer et Brown ne sont pas entièrement satisfaits. On peut en effet énumérer un certain nombre de critiques. Pour constater que tous les processeurs de la frange sont bloqués, on réalise un sondage global qui viole le principe de localité. Ensuite il n'y a aucune justification aux heuristiques, et même si ces heuristiques fonctionnent bien, celles-ci génèrent néanmoins de l'ambiguïté. A l'occasion, elles génèrent également des valeurs fausses et on est alors obligé de faire du backtracking. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que cette théorie est en pleine évolution et que de nouvelles idées sont en train de voir le jour. Tout ceci est donc loin d'être définitif, mais nous en resterons là. Nous allons maintenant aborder une autre approche de la physique qualitative. Il s'agit de la théorie qualitative des processus de K. Forbus.



### 3.3 APPROCHE DE FORBUS

Le monde physique est composé d'objets qui subissent différents types de changements au cours du temps. Par exemple, les objets peuvent se déplacer, entrer en collision, couler, se plier, se réchauffer, se refroidir, s'étirer, se compresser, bouillir, ... Pour comprendre la dynamique des choses qui l'entourent, l'homme semble disposer de connaissances particulières portant le nom de "*sens commun*". Forbus se propose d'analyser le raisonnement basé sur ce sens commun.

Ce qui provoquent les changements dans les objets, ce sont des processus. En physique classique, les processus sont caractérisés par des équations différentielles qui décrivent comment les paramètres des objets changent dans le temps. Cependant, la notion de processus est plus riche que cela: comme nous le verrons, elle permet de tirer des conclusions basées sur très peu d'informations.

Dès lors, la compréhension de la dynamique du monde physique doit passer par la compréhension du raisonnement qualitatif sur les processus. Ceci nécessite de répondre aux questions suivantes: quand surviennent les processus, quels sont leurs effets, quand s'arrêtent-ils? Forbus a développé la *théorie qualitative des processus* [4] dans ce but. Il tente par là de modéliser le raisonnement qualitatif (ou raisonnement du sens commun) sur le monde physique. Les propriétés qu'il veut donner à sa théorie sont les suivantes:

- 1) sa théorie doit permettre de spécifier les effets directs des processus et les moyens par lesquels ces effets sont propagés;
- 2) les descriptions qu'elle fournit doivent être composables: il doit être possible de décrire une situation physique en décrivant les objets qui la composent et leurs connexions;
- 3) elle doit être facilement extensible, c'est-à-dire:
  - a) avec des données plus précises, il doit être possible de tirer au moins les mêmes conclusions que celles obtenues avec des données plus faibles;
  - b) il doit être possible de résoudre les ambiguïtés avec de l'information plus précise.

La suite de ce paragraphe expose les points suivants:

- comment représenter les objets du monde physique?
- comment représenter les processus physiques?
- à partir de ces représentations, quelles sont les déductions de base que permet de faire la théorie qualitative des processus?
- quelles sont les caractéristiques du raisonnement causal effectué dans cette théorie?



### 3.3.1 REPRESENTATION DES OBJETS ET DES QUANTITES

Nous présentons ci-dessous la manière dont Forbus décrit les objets et leurs propriétés.

#### A) Les quantités

Tout objet du monde physique peut être caractérisé par un certain nombre de paramètres dont les valeurs peuvent évoluer dans le temps. La représentation d'un paramètre continu pour un objet est appelée une quantité.

Exemple de paramètres pouvant être représentés par des quantités:

A un sac élastique S, on peut associer les paramètres "pression" et "volume". Pour représenter ces paramètres, Forbus utilise les prédicats Quantity-type pour définir les types de quantité existant et Has-quantity pour dire qu'un objet a un type particulier de quantité:

Quantity-type (pression) , Quantity-type (volume) ,

Has-quantity (S,pression) , Has-quantity (S,volume).

Une quantité comprend deux parties: un montant et une dérivée qui sont des nombres. Chaque nombre est lui-même constitué de deux parties: un signe et une magnitude (valeur absolue) qui représentent la valeur de ce nombre.

$$\begin{array}{rcl}
 & & \begin{array}{l} \boxed{\phantom{0}} \quad 1 \text{ signe} \\ \boxed{\phantom{0}} \quad + \\ \boxed{\phantom{0}} \quad 1 \text{ magnitude} \end{array} \\
 \boxed{\phantom{0}} \quad 1 \text{ montant} & = & \boxed{\phantom{0}} \quad 1 \text{ nombre} = \\
 \boxed{\phantom{0}} & & \boxed{\phantom{0}} \\
 1 \text{ quantité} & = & \boxed{\phantom{0}} \quad + \\
 \boxed{\phantom{0}} & & \boxed{\phantom{0}} \quad 1 \text{ signe} \\
 \boxed{\phantom{0}} \quad 1 \text{ dérivée} & = & \boxed{\phantom{0}} \quad 1 \text{ nombre} = \boxed{\phantom{0}} \quad + \\
 & & \boxed{\phantom{0}} \quad 1 \text{ magnitude}
 \end{array}$$

Pour distinguer les différents éléments d'un nombre ou d'une quantité, nous utiliserons les notations suivantes:

m [n] - magnitude du nombre n,

s [n] - signe du nombre n,

m [A (Q)] - magnitude du montant de la quantité Q,

s [A (Q)] - signe du montant de la quantité Q,

m [D (Q)] - magnitude de la dérivée de la quantité Q,

s [D (Q)] - signe du montant de la quantité Q.

avec les abréviations: "m" pour magnitude,

"s" pour signe,

"A" pour montant (amount),

"D" pour dérivée.



Lorsqu'il sera nécessaire d'indiquer l'objet auquel se rattache la quantité, nous compléterons notre notation comme suit:

m [A (Q, OB)] - magnitude du montant de la quantité Q de l'objet OB,

s [A (Q, OB)] - signe du montant de la quantité Q de l'objet OB,

m [D (Q, OB)] - magnitude de la dérivée de la quantité Q de l'objet OB,

s [D (Q, OB)] - signe du montant de la quantité Q de l'objet OB,

Ex: m [A (pression, VG)] désigne la valeur absolue du montant de la pression du ventricule gauche (VG);

s [D (volume, VG)] désigne le signe de la dérivée du volume du ventricule gauche (VG).

La dérivée d'une quantité peut être le montant d'une autre quantité; par exemple, dans notre modèle, le montant de IC est égal à la dérivée de QC.

Le signe d'un nombre ne peut prendre qu'une des valeurs suivantes:

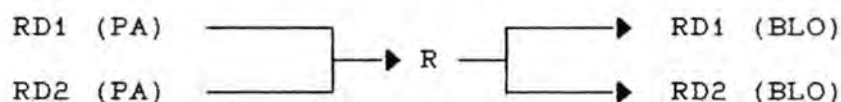
-1 pour les nombres négatifs,  
0 pour les nombres nuls,  
1 pour les nombres positifs.

Tout nombre (montant ou dérivée) prend sa valeur dans l'ensemble des réels alors que toute magnitude prend la sienne dans l'ensemble des réels non négatifs. Soulignons cependant que dans la théorie qualitative des processus, nous ne connaissons jamais la valeur numérique d'un nombre ou d'une magnitude. Ce que nous devons connaître sur les valeurs des nombres et magnitudes est décrit ci-dessous.

## B) L'espace de quantité

La valeur d'un nombre ou d'un paramètre est décrite en termes de son espace de quantité. L'espace de quantité d'un nombre ou d'une magnitude consiste en un ensemble d'éléments (nombres ou magnitudes, souvent les montants des quantités) B et un ensemble d'ordonnancements entre ces éléments.

Ex: L'espace de quantité des résistances de notre modèle pourrait être représenté comme suit:



où les flèches indiquent que la quantité à son extrémité initiale est inférieure à celle se trouvant à son extrémité finale. Les relations d'ordonnement présentes dans cet espace de quantité sont:

RD1 (PA) < R  
RD2 (PA) < R  
R < RD1 (BLO)  
R < RD2 (BLO)  
RD1 (PA) < RD1 (BLO)  
RD1 (PA) < RD2 (BLO)  
RD2 (PA) < RD1 (BLO)  
RD2 (PA) < RD2 (BLO)

La valeur d'un nombre n est donc décrite par les relations d'ordonnement entre n et les autres éléments de son espace de quantité. La valeur est complètement spécifiée si et seulement si les ordonnancements entre tous les éléments de B sont connus (i.e. les ordonnancements forment un ordre total); elle est incomplète autrement (ordre partiel).

Ex: L'espace de quantité schématisé ci-dessus est incomplet puisqu'il ne contient aucune relation d'ordonnement entre RD1 (PA) et RD2 (PA), ni entre RD1 (BLO) et RD2 (BLO).

Tous les espaces de quantité ont l'élément particulier ZERO servant

- à associer le signe d'un nombre avec des relations d'inégalité de la manière suivante:

pour tout nombre n,  $n > \text{ZERO} \iff s[n] = 1$   
 $n = \text{ZERO} \iff s[n] = 0$   
 $n < \text{ZERO} \iff s[n] = -1$

- à associer la magnitude d'un nombre à la valeur de ce nombre et à son signe comme suit:

pour tout nombre n,  $m[n] > \text{ZERO}$  ou  $m[n] = \text{ZERO}$ ,  
 $m[n] = \text{ZERO} \iff s[n] = 0 \quad (*)$



De la dernière propriété ci-dessus (\*), on déduit que si la valeur de  $s[D]$  d'une quantité est 0, alors la dérivée elle-même,  $m[D]$ , est ZERO et la quantité ne change pas. Cependant si  $s[D]$  est différent de 0, alors la quantité change, ce qui peut provoquer des modifications dans l'ordonnancement. Soit, par exemple, l'espace de quantité à un instant  $t_1$ :

(A et B positifs avec  $|A|$  inférieure à  $|B|$ )

$$\begin{array}{ccc} m[M(A)] & \longrightarrow & m[M(B)] \\ s[M(A)] = 1 & & s[M(B)] = 1 \end{array}$$

(A augmente mais B ne bouge pas)

$$s[D(A)] = 1 \quad s[D(B)] = 0$$

A augmentant et B étant statique, il se peut que la relation

$$m[M(A)] < m[M(B)]$$

ne soit plus respectée à un instant  $t_2$  (avec  $t_1 < t_2$ ) où l'on aurait la relation

$$m[M(A)] = m[M(B)].$$

L'espace de quantité associé à  $t_2$  est donc différent de celui associé à  $t_1$ . Les ordonnancements ne sont donc pas fixes dans le temps.

### C) Vues d'individu

Les objets peuvent être créés et détruits, et leurs propriétés peuvent évoluer au cours du temps. Par exemple, un sac élastique gonflé trop fort peut éclater et perdre ainsi beaucoup de ses propriétés.

Pour modéliser ce type de changement, nous utilisons les vues d'individu. Une vue d'individu est composée de quatre parties:

- 1) la liste des individus: objets qui doivent exister pour que la vue soit applicable;
- 2) les préconditions: conditions qui doivent être vraies pour que la vue soit applicable;
- 3) les conditions de quantités: ensemble d'inégalités entre les quantités des individus et de déclarations concernant l'applicabilité d'autres vues d'individu ou de processus;
- 4) une collection de relations qui sont vraies chaque fois que la vue est applicable.

Ex: L'aorte est un sac élastique gonflé et un sac élastique gonflé peut être spécifié par la vue d'individu suivante:

Vue d'individu: sac élastique gonflé

1) Individu: OB un objet;

2) Préconditions:

- Elastic-substance (made-of (OB))  
i.e. OB est fait d'une substance élastique;
- OB non troué;

3) Conditions de quantité:

- Has-quantity (OB, volume),
- Has-quantity (OB, pression),
- Has-quantity (OB, volume-au-repos),  
i.e. OB est un objet caractérisé par trois quantités: un volume, une pression et un volume au repos (volume incompressible);
- Can-contain-substance(OB) i.e. OB peut renfermer une certaine substance;
- volume(OB) > volume-au-repos(OB) i.e. un sac élastique est gonflé si son volume est supérieur à son volume au repos;



#### 4) Relations:

- $s [D (\text{volume-au-repos}, OB)] = 0$  i.e. la dérivée du volume au repos de l'objet OB a pour signe 0: le volume au repos de OB ne change pas avec le temps;
- $\text{pression}(OB) \propto \text{volume}(OB)$  i.e. la pression de OB est une fonction strictement croissante de son volume (voir les dépendances fonctionnelles au point D).

Tout ensemble d'objets satisfaisant à la liste des individus d'une vue individuelle est appelé une instantiation de la vue. Une instantiation est active si les préconditions et les conditions de quantité sont vérifiées; sinon elle est inactive. Chaque fois qu'une instantiation est active, ses individus satisfont aux relations spécifiées.

Dans l'exemple ci-dessus, si nous avons un objet (individu) fait d'une matière élastique, n'étant pas troué (préconditions), pouvant contenir une substance, ayant une pression, un volume et un volume au repos, avec un volume supérieur à son volume au repos (conditions de quantité), alors la vue d'individu attachée à cet objet est active; on en déduit que cet objet est un sac élastique et a les propriétés suivantes (relations):

- $s [D (\text{volume-au-repos}, OB)] = 0$ ,
- $\text{pression}(OB) \propto \text{volume}(OB)$ .

La distinction entre préconditions et condition de quantité permet de séparer les changements pouvant être déduits de la dynamique (conditions de quantité) des autres (préconditions).

Ex: Si le volume d'un sac élastique OB diminue, il est possible que ce sac se dégonfle complètement (volume = volume-au-repos). Dès lors, la condition de quantité, volume > volume-au-repos n'est plus respectée: l'instantiation de vue pour OB devient inactive. Nous n'avons plus un sac gonflé mais un sac au repos. Nous verrons comment un tel changement peut être prédit à partir des conditions de quantité. Par contre, il n'est pas possible de prévoir à partir de la dynamique qu'un chirurgien va couper dans notre sac (aorte). Les préconditions servent à modéliser ce type de changement imprévisible à l'intérieur de la dynamique; ex: "OB non troué".

#### D) Dépendances fonctionnelles

Une notion clé de la théorie qualitative des processus est que les processus physiques et les vues d'individu dans une situation induisent des dépendances fonctionnelles entre les paramètres de cette situation. En d'autres mots, en connaissant la physique, on peut dire ce qui arrivera à un paramètre quand on en varie un autre.

Afin de représenter ces dépendances, nous définissons la notation "qualitativement proportionnel" ou " $\alpha q$ " telle que:

$Q1 \alpha q Q2 \iff$  il existe une fonction qui détermine  $Q1$  et dépendant de  $Q2$ ; en notation algébrique, on écrirait:  $Q1 = f(\dots, Q2, \dots)$ .

Les notations  $Q1 \alpha q+ Q2$  et  $Q1 \alpha q- Q2$  sont utilisées respectivement pour indiquer que la fonction déterminant  $Q1$  dépend de  $Q2$  de manière strictement croissante ou décroissante.

Ex: pression(OB)  $\alpha q+$  volume(OB) i.e. lorsque le volume du sac élastique OB augmente, sa pression augmente aussi.

Un autre type d'information peut être enregistrée sur les quantité  $Q1$  et  $Q2$  reliées par " $\alpha q$ ": les correspondances. Dans certains cas, lorsque la quantité déterminatrice prend une valeur particulière, la quantité déterminée prend elle aussi une valeur particulière. Une correspondance met en relation ces deux valeurs.

Ex: Correspondance ( (pression(OB) ZERO)  
(volume(OB) volume-au-repos(OB) )

i.e. lorsque le volume de OB est égal à son volume de repos, la pression à l'intérieur de OB est nulle.

Les correspondances sont le moyen de relier entre eux des espaces de quantités via  $\alpha q$ . Dans l'exemple ci-dessus, la correspondance relie l'espace de quantité des pressions à celui des volumes.



### E) Histoires

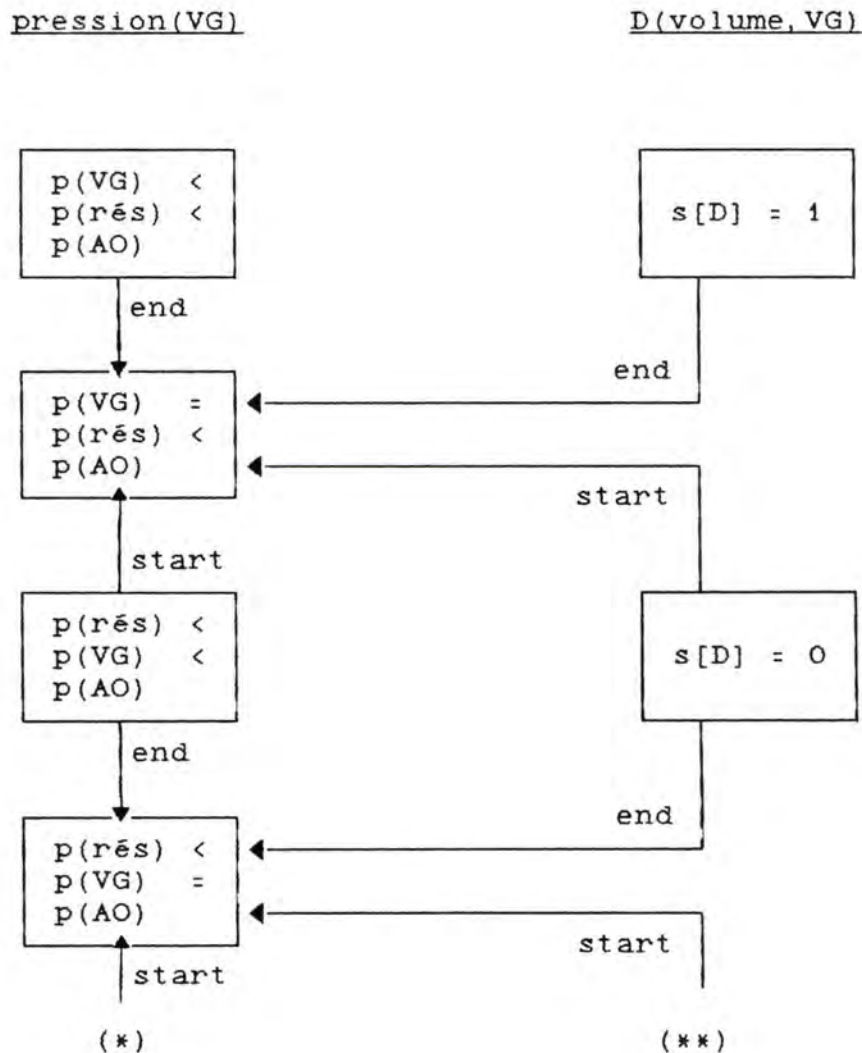
Les objets peuvent avoir plus d'un paramètre et ces paramètres peuvent souvent changer indépendamment. Pour représenter comment les objets, et donc leurs paramètres, changent avec le temps, nous utilisons la notion d'histoire.

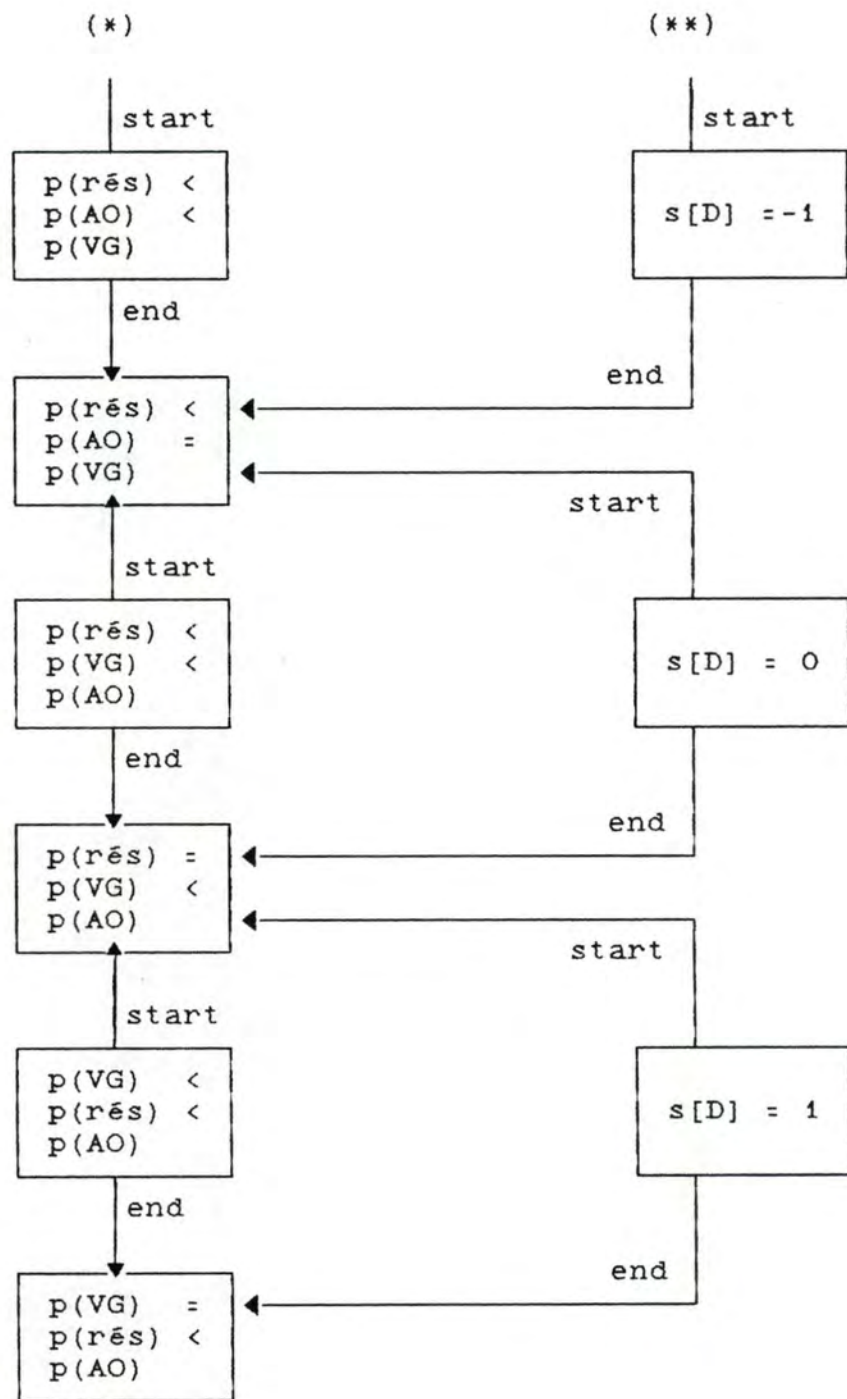
L'histoire d'un paramètre est composée:

- d'épisodes: intervalles de temps pendant lequel l'espace de quantité de ce paramètre ne change pas.
- d'événements: instant où l'espace de quantité de ce paramètre change.

L'histoire d'un objet est représentée par l'union des histoires de ses paramètres.

Ex: En partant d'un épisode pendant lequel le ventricule gauche VG se remplit, l'histoire du ventricule pendant un cycle complet du battement cardiaque peut être schématisé de la manière suivante:







### 3.3.2 REPRESENTATION DES PROCESSUS PHYSIQUES

#### A) Spécification d'un processus

Une situation physique est généralement décrite en termes d'une collection d'objets, de leurs propriétés et des relations entre ces objets. Cette description est statique: elle nous permet de déduire qu'une situation à un instant n'est pas la même à un autre instant, mais elle est incapable de nous renseigner sur les raisons des changements survenus. Pour combler cette lacune, il faut introduire la notion de processus. Un processus physique est quelque chose qui agit dans le temps pour modifier les paramètres des objets. Un processus est spécifié par:

- 1) les individus auxquels il s'applique;
- 2) un ensemble de préconditions concernant les individus et leurs relations (autres que les conditions de quantités);
- 3) un ensemble de conditions de quantité: conditions d'inégalité ou de status de processus ou vues d'individu;
- 4) un ensemble de relations que les processus imposent entre les paramètres des individus et de toute nouvelle entité créée;
- 5) un ensemble d'influences imposées par le processus sur les paramètres des individus.

Ex: Pour que notre VG ou notre aorte puisse se remplir, il doit y avoir un flux de sang vers eux. Dans notre modèle, nous remarquons 3 flux:

```
rés —> VG
VG —> AO
AO —> veines.
```

Sans un processus de flux, les paramètres (pression et volume) du VG ou de AO ne pourrait changer. Nous définissons le processus de flux de fluide comme suit:

#### Processus: flux de fluide

##### 1) Individus:

Afin qu'un flux de fluide soit possible, 3 individus doivent exister:

- src: liquide contenu dans un sac qui sera la source du flux;
- dst: liquide contenu dans un sac qui sera la destination du flux
- path: chemin le long duquel peut s'écouler un fluide;

De plus, le chemin Path doit relier Src et Dst:  
Connexion-fluide (src, dst, path)

2) Préconditions:

Rien ne doit empêcher le fluide de s'écouler à travers le chemin path, c'est-à-dire qu'il n'existe aucune valve sur ce chemin ou que toutes les valves existantes sont ouvertes:

Aligned (path)

Dans le cas du ventricule gauche, cela signifie que la valve mitrale est ouverte.

3) Condition de quantité:

Le flux n'est possible que si la pression de la source est supérieure à celle de la destination:

$$m[A(\text{pression}, \text{src})] > m[A(\text{pression}, \text{dst})]$$

4) Relations:

Le processus est caractérisé par un paramètre: le taux de flux. Celui-ci est fonction croissante de la différence de pression entre la source et la destination:

$$\text{taux-flux} \propto (m[A(\text{pression}, \text{src})] - m[A(\text{pression}, \text{dst})])$$

5) Influences

I+ (volume(dst), A[taux-flux])

I- (volume(src), A[taux-flux])

Un processus est spécifié de la même manière qu'une vue individuelle mais avec quelque chose en plus appelé "influences (voir le point B ci-dessous). Tout ensemble d'objets satisfaisant à la spécification des individus pour un type particulier de processus est appelé une instantiation du processus. Une instantiation est active si les préconditions et les conditions de quantité sont vérifiées; elle est inactive autrement. L'ensemble des relations associées à un processus est l'ensemble des relations que ce processus impose entre les objets sur lesquels il agit.



## B) Les influences

Une quantité peut être influencée par un (ou plusieurs ) processus, ou par une (ou plusieurs) autre(s) quantité(s).

Ex: ■ Le taux de flux dépend de 2 quantités: la pression de la source et la pression de la destination.

- Le processus de flux tend à diminuer la quantité de liquide de la source et à augmenter celle de la destination; ce processus étant représenté par la quantité taux-flux, on dit que ce taux de flux influence négativement la quantité de liquide de la source et positivement la quantité de liquide de la destination. Ceci se note respectivement:

I+ (volume(dst), A[taux-flux])

I- (volume(src), A[taux-flux])

Le processus étant le mécanisme par lequel les changements du monde physique surviennent, on dira qu'une quantité influencée par un processus est directement influencée. Une quantité sera dite indirectement influencée si elle est une fonction d'autre(s) quantité(s) qui change(nt).

Les influences directes spécifient les changements provoqués par un processus. Elles sont représentées dans le composant "influences" de la spécification d'un processus. Les influences indirectes sont spécifiées au moyen des proportionnalités qualitatives ( $\alpha q$ ) vues précédemment.

Dès lors, une quantité influence indirectement une autre quantité si la seconde est qualitativement proportionnelle à la première; un processus influence indirectement une quantité Q1 s'il influence directement une quantité Q2 influençant indirectement Q1. A tout moment, une quantité est influencée directement, indirectement ou pas du tout.

Par hypothèses,

- aucune quantité n'est influencée à la fois directement et indirectement;
- tous les changements dans les systèmes physiques sont causés directement ou indirectement par des processus (hypothèse du mécanisme unique);
- tous les processus intervenant dans un domaine sont connus (hypothèse du monde fermé).

Les deux dernières hypothèses ci-dessus nous permettent de raisonner par exclusion: connaissant tous les processus d'un domaine particulier et ainsi tous les types de quantités pouvant être influencées directement (hypothèse du monde fermé), si nous comprenons bien les objets et les relations entre eux, alors nous connaissons toutes les manières dont les quantités peuvent être indirectement influencées (hypothèse du monde fermé) et donc, nous connaissons toutes les manières potentielles dont une situation physique peut changer. Nous verrons au point 3.3.5 que la première hypothèse sert au raisonnement causal.

### 3.3.3 DEDUCTIONS DE BASE

La modélisation d'un système consiste à spécifier tous les individus pouvant exister à un moment donné dans ce système (spécifications des vues d'individus) et tous les processus pouvant agir sur ce système à un moment donné (spécifications des processus).

Dans ce paragraphe, nous développons les déductions de base que ce type de modélisation nous permet de réaliser.

#### A) Recherche des processus et vues d'individu possibles

A partir de ces spécifications et de la connaissance des objets présents dans le système à un instant, il est possible de déduire toutes les instantiations de processus ou de vues relatives à ce système. Il suffit pour cela de vérifier, pour chaque processus ou vues, si la liste d'individus nécessaires à leur existence est incluse dans la collection d'objets présents dans le système.

Ex: soit VG un ventricule,  
AO une aorte,  
Path-1 un chemin reliant VG à AO;

ces objets donnent lieu:

- à deux instantiations de vues d'individu pour un sac élastique (une pour VG et une pour AO);
- à deux instantiations du processus de fluide: une pour un flux de VG vers AO et une pour un flux de AO vers VG (cas d'une insuffisance de la valve aortique);

La détermination des instantiations de processus est particulièrement importante puisque ces instantiations représentent les processus potentiels qui peuvent survenir entre les objets du système.

Ex: dans l'exemple ci-dessus, les seuls processus pouvant exister sont les processus de flux entre VG et AO, et entre AO et VG.

#### B) Détermination de l'activité

Pour chaque instantiation de vues ou processus, la vérification des préconditions et des conditions de quantité permet d'obtenir:

- la structure des processus: ensemble des instantiations de processus actives;
- la structure de vue: ensemble des vues d'individu actives.



Ex: Sachant qu'un ventricule et une aorte sont faits d'une matière élastique, ont un volume, une pression et un volume-au-repos, et peuvent renfermer une substance, si on suppose VG et AO non troués avec

$$\begin{aligned} \text{volume (VG)} &> \text{volume-au-repos (VG)}, \\ \text{volume (AO)} &> \text{volume-au-repos (VG)}, \\ \text{pression (VG)} &< \text{pression (AO)}, \end{aligned}$$

alors la structure de vue est l'ensemble:

$$\{ \text{sac-élastique-gonflé (VG)} , \text{sac-élastique-gonflé (AO)} \}$$

et la structure de processus est l'ensemble à un seul élément:

$$\{ \text{flux-de-fluide (VG , AO , Path-1)} \} ;$$

le processus de flux de AO vers VG n'est pas actif puisque la condition de quantité

$$m[A(\text{pression}, \text{AO})] > m[A(\text{pression}, \text{VG})]$$

n'est pas satisfaite.

### C) Détermination des changements

Les changements dans un individu sont représentés par les valeurs des signes des dérivées,  $s[D]$ , de ses quantités: une valeur -1 pour  $s[D]$  indique que la quantité décroît, une valeur de 1 indique que la quantité croît et une valeur 0 indique qu'elle reste constante.

Une quantité peut changer de deux manières: elle peut être influencée directement par un processus ou indirectement via une dépendance fonctionnelle  $\alpha q$ . Par l'hypothèse du mécanisme unique, si une quantité n'est pas du tout influencée, sa valeur de  $s[D]$  est 0. Déterminer les valeurs de  $s[D]$  pour une quantité est appelé résoudre ses influences directes ou indirectes. Rappelons que par hypothèse, aucune quantité n'est influencée à la fois directement et indirectement.

Résoudre les influences directes d'une quantité nécessite d'additionner toutes ces influences: si tous les signes des influences sont les mêmes, alors la valeur de  $s[D]$  est ce signe; sinon il y a ambiguïté. Les inégalités des espaces de quantité permettent parfois de lever une telle ambiguïté.

Ex: Soient les quantités A et B, et leurs dérivées D(A) et D(B), l'addition des signes de ces deux dérivées peut être spécifié par le tableau suivant:

$$s [D(A) + D(B)]$$

		$s [D(B)]$		
$s [D(A)]$	$s [D(B)]$	-1	0	1
	-1	-1	-1	N1
	0	-1	0	1
	1	N1	1	1

Les points N1 désignent les cas où il y a ambiguïté. Pour être résolue, celle-ci requiert de l'information additionnelle sur les magnitudes des dérivées:

N1: if  $m[D(A)] > m[D(B)]$ , then  $s[D(A) + D(B)] = s[D(A)]$   
 if  $m[D(B)] > m[D(A)]$ , then  $s[D(A) + D(B)] = s[D(B)]$   
 if  $m[D(A)] = m[D(B)]$ , then  $s[D(A) + D(B)] = 0$

Pour résoudre les influences indirectes d'une quantité, il faut rassembler et additionner toutes les proportionnalités qualitatives  $\alpha q$  spécifiant que cette quantité est une fonction d'autres quantités. Ici aussi peut surgir une ambiguïté puisque une influence indirecte peut s'opposer à une autre.

Ex: Soient les proportionnalités qualitatives

$A \propto q^+ B$  ,  $A \propto q^+ C$  ,  $D \propto q^+ B$  et  $D \propto q^- E$ ,

avec  $s[D(B)] = 1$  ,  $s[D(C)] = -1$  et  $s[D(E)] = 0$ ;

le signe de la dérivée de D peut être déterminé comme suit:

$$s[D(D)] = s[D(B) + D(E)] = 1;$$

par contre, celui de A ne peut l'être si on ne connaît la relation d'ordre entre les magnitudes de D(B) et D(C):

$$s[D(A)] = s[D(B) + D(C)] = ?$$



#### D) Analyse limite

Un espace de quantité consiste en une collection d'éléments et d'ordonnements entre objets. La source principale d'éléments pour l'espace de quantité d'une quantité Q sont les nombres et constantes qui sont comparées à Q dans les conditions de quantité des processus et vues actifs. Ces nombres et constantes sont appelés points limites puisqu'ils correspondent à des frontières que Q ne peut dépasser sans provoquer des modifications dans les structures de processus et vues.

Déterminer ces changements et les changements dans les signes de dérivées  $s[D]$  est appelé analyse limite. Une telle analyse est exécutée en utilisant les espaces de quantité et les valeurs courantes de  $s[D]$  afin de déterminer comment les espaces de quantité, et ainsi la satisfaction des conditions de quantité, peuvent changer.

La première étape consiste, pour chaque quantité qui change, à trouver ses points voisins dans l'espace de quantité. Sont appelés voisins deux éléments qui sont ordonnés avec aucun élément entre eux dans l'ordonnement connu (cas de l'ordre partiel). Dans l'espace de quantité:

$$m [M (A)] \rightarrow m [M (B)] = m [M (C)],$$

$m [M (A)]$  et  $m [M (B)]$  sont voisins,

$m [M (B)]$  et  $m [M (C)]$  sont voisins,

$m [M (A)]$  et  $m [M (C)]$  ne sont pas voisins.

Au cours de la deuxième étape, on compare la valeur  $s[D]$  de chaque quantité changeante avec celle de ses voisins pour voir si leur ordonnancement dans l'espace de quantité peut changer. Les valeurs des paramètres des objets ne variant, par hypothèse, que de manière continue, seuls les changements entre voisins doivent être considérés:

- continu dans les magnitudes des nombres signifie que toutes les relations d'inégalité doivent passer par l'égalité: une relation d'inégalité entre  $Q_1$  et  $Q_2$  ne peut passer directement de "<" à ">" ou inversement, de ">" à "<" ;
- continu dans les signes des nombres signifie qu'une valeur de  $s[n]$  ne peut passer directement de 1 à -1 ou de -1 à 1.

Ainsi, pour déterminer les changements pouvant survenir dans un espace de quantité, il faut d'abord repérer les voisins. Dans l'exemple ci-dessus, si l'on suppose que A et B sont statiques et que C diminue, alors la modification de la relation

$$m [M (A)] < m [M (C)]$$

en la relation

$$m [M (A)] = m [M (C)]$$

ne peut être prise directement en considération (A et C non voisins). Ceci impliquerait que  $m[M(C)]$  ne passe pas par la valeur de  $m[M(B)]$  et ainsi ne respecte pas l'hypothèse de continuité. Dès lors, le seul changement pouvant être pris en compte ici concerne l'inégalité entre  $m[M(B)]$  et  $m[M(C)]$ , qui est le seul changement possible entre voisins.

Soient deux quantités voisines A et B, les changements possibles dans l'ordonnancement de A et B sont spécifiés par les tableaux:

si  $A > B$ :

$s[D(A)]$	$s[D(B)]$	-1	0	1
-1		N1	=	=
0		>	>	=
1		>	>	N2

N1: if  $m[D(A)] > m[D(B)]$ , then = ; else >

N2: if  $m[D(A)] < m[D(B)]$ , then = ; else >

si  $A = B$ :

$s[D(A)]$	$s[D(B)]$	-1	0	1
-1		N3	<	<
0		>	=	<
1		>	>	N4

N3: if  $m[D(A)] > m[D(B)]$ , then <

if  $m[D(A)] < m[D(B)]$ , then >

if  $m[D(A)] = m[D(B)]$ , then =

N4: if  $m[D(A)] < m[D(B)]$ , then >

if  $m[D(A)] > m[D(B)]$ , then <

if  $m[D(A)] = m[D(B)]$ , then =



Ex: Soit l'espace de quantité

$$\text{pression(rés)} \longrightarrow \text{pression(VG)} = \text{pression(AO)}$$
$$s[D(\text{pression}, \text{rés})] = 0$$
$$s[D(\text{pression}, \text{VG})] = -1$$
$$s[D(\text{pression}, \text{AO})] = -1$$

nous avons ici 2 quantités qui changent, pression(VG) et pression(AO). Les points voisins de pression(VG) sont pression(rés) et pression(AO); ceux de pression(AO) sont pression(rés) et pression(VG). En utilisant les tableaux ci-dessus, nous obtenons l'ensemble des changements possibles:

$$\text{pression(rés)} = \text{pression(VG)},$$
$$\text{pression(rés)} = \text{pression(AO)},$$
$$\text{pression(VG)} < \text{pression(AO)},$$
$$\text{pression(VG)} > \text{pression(AO)}.$$

La troisième étape consiste à déterminer les ensembles de changements compatibles. En effet, parmi les changements possibles, certains peuvent se produire simultanément. Par contre, d'autres peuvent s'exclure mutuellement. Des changements sont compatibles:

- si aucun changement ne fait disparaître un individu apparaissant dans les autres changements;

Ex: soit les changements "AO disparaît" (ablation de l'aorte) et "pression(VG) < pression(AO)"; ils sont incompatibles puisque le premier suppose la disparition d'une quantité sur laquelle est définie le second;

- si leur conjonction ne provoque pas de discontinuité dans les espaces de quantité:

Ex: soient les changements

$$\text{pression(rés)} = \text{pression(VG)},$$
$$\text{pression(VG)} > \text{pression(AO)},$$

bien que possibles individuellement, ils sont incompatibles car il en résulte l'espace de quantité,

$$\text{pression(AO)} \longrightarrow \text{pression(VG)} = \text{pression(rés)},$$

qui est discontinu par rapport au précédent puisque l'inégalité

$$\text{pression(rés)} \longrightarrow \text{pression(AO)}$$

devient directement

$$\text{pression(AO)} \longrightarrow \text{pression(rés)}$$

En rassemblant les changements individuels et les conjonctions de changements compatibles, on obtient l'ensemble des hypothèses de quantité. Dans notre exemple, cet ensemble serait le suivant:

```
{ pression(rés) = pression(VG) ,
  pression(rés) = pression(AO) ,
  pression(VG) < pression(AO) ,
  pression(VG) > pression(AO) ,
  pression(rés) = pression(VG) et pression(rés) = pression(AO),
  pression(rés) = pression(VG) et pression(VG) < pression(AO) ,
  pression(rés) = pression(AO) et pression(AO) < pression(VG) }
```

Si une quantité qui change a pour voisin un point limite, certains processus peuvent se terminer et d'autres commencer. Dès lors, l'ensemble des changements possibles (dans les ordonnancements) impliquant des points limites détermine les manières dont l'ensemble courant de processus actifs pourrait changer. Toute hypothèse de quantité imposant un changement dans les structures de processus ou vues est dite hypothèse limite. Dans notre exemple, les hypothèses limites sont:

```
pression(VG) < pression(AO),
pression(VG) > pression(AO),
pression(rés) = pression(VG) et pression(VG) < pression(AO) ,
pression(rés) = pression(AO) et pression(AO) < pression(VG) ,
```

puisque ces changements provoqueraient soit l'activation d'un processus de flux de AO vers VG (cas d'une insuffisance de la valve aortique) ou un flux de VG vers AO (systole).

La quatrième étape permet de déterminer l'ordre dans lequel vont se réaliser les changements, c'est-à-dire les hypothèses de quantité. Pour résoudre ce problème, Forbus définit la loi des changements d'égalité:

*"Le changement à partir d'une égalité survient en un instant tandis que le changement vers l'égalité prend un intervalle de temps."*

Autrement dit, lorsque plusieurs changements sont possibles, les changements vers l'inégalité se produisent d'abord car ils n'ont besoin que d'un instant pour se réaliser alors qu'il faut un intervalle de temps pour qu'un changement vers l'égalité se produise. Dans notre exemple, parmi les hypothèses de quantité, seules:

```
pression(VG) < pression(AO) ,
pression(VG) > pression(AO) ,
```

satisfont à cette loi. Elles représentent les changements potentiels pouvant survenir dans le système.



### 3.3.4 PROCESSUS ET HISTOIRES

Nous avons vu que la notion d'histoire de paramètre permettait de représenter les changements des objets. Maintenant, nous devons introduire la notion d'histoire de processus pour décrire les changements dans les processus: quels sont les processus actifs à un moment donné, quand démarre un processus, quand s'arrête-t-il?

L'histoire d'un processus est composée:

- d'**épisodes**: plus grands intervalles de temps pendant lequel le status de l'instantiation de ce processus est constant (actif ou inactif);
- d'**événements**: instants auxquels les conditions de quantité, les préconditions ou l'existence d'objets impliqués dans l'instantiation changent.

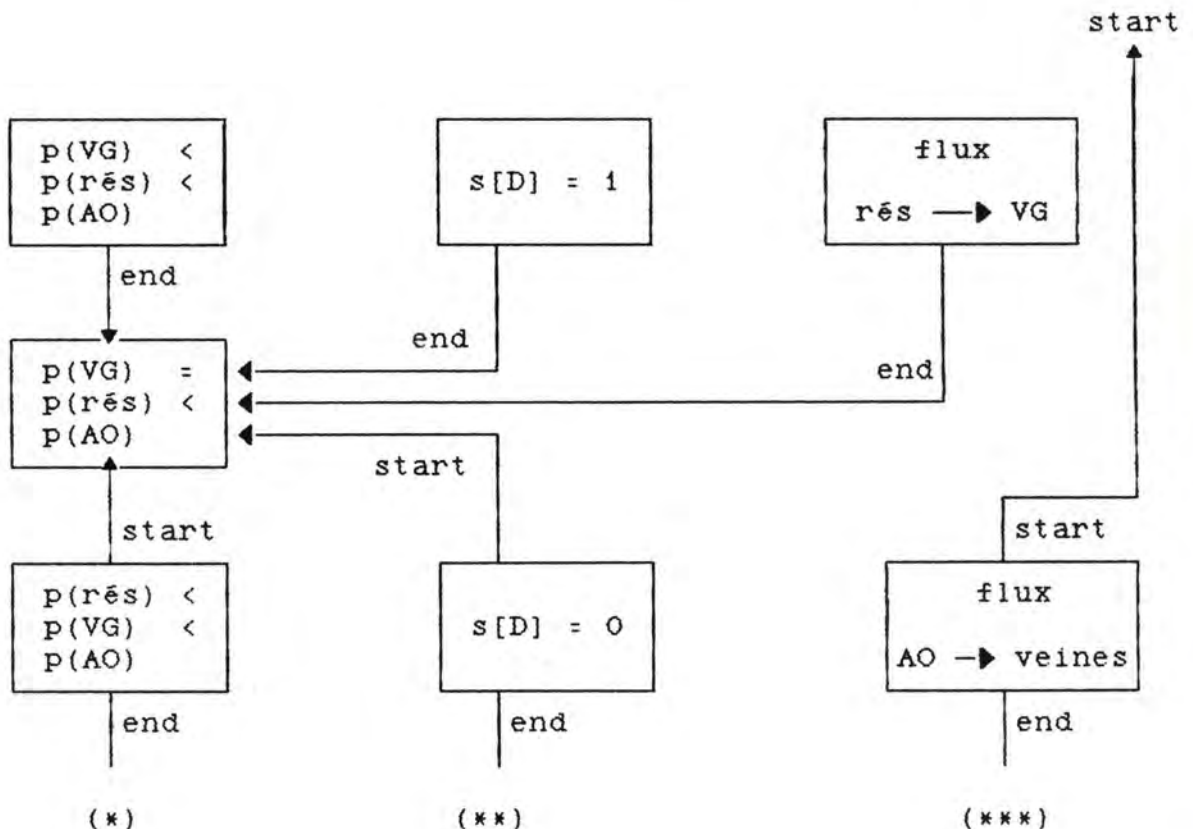
De la même manière, les histoires de vues décrivent le status des instantiations de vue. L'union des histoires de paramètres d'un objet avec les histoires des processus et vues auxquels cet objet participe représente l'**histoire totale** de cet objet.

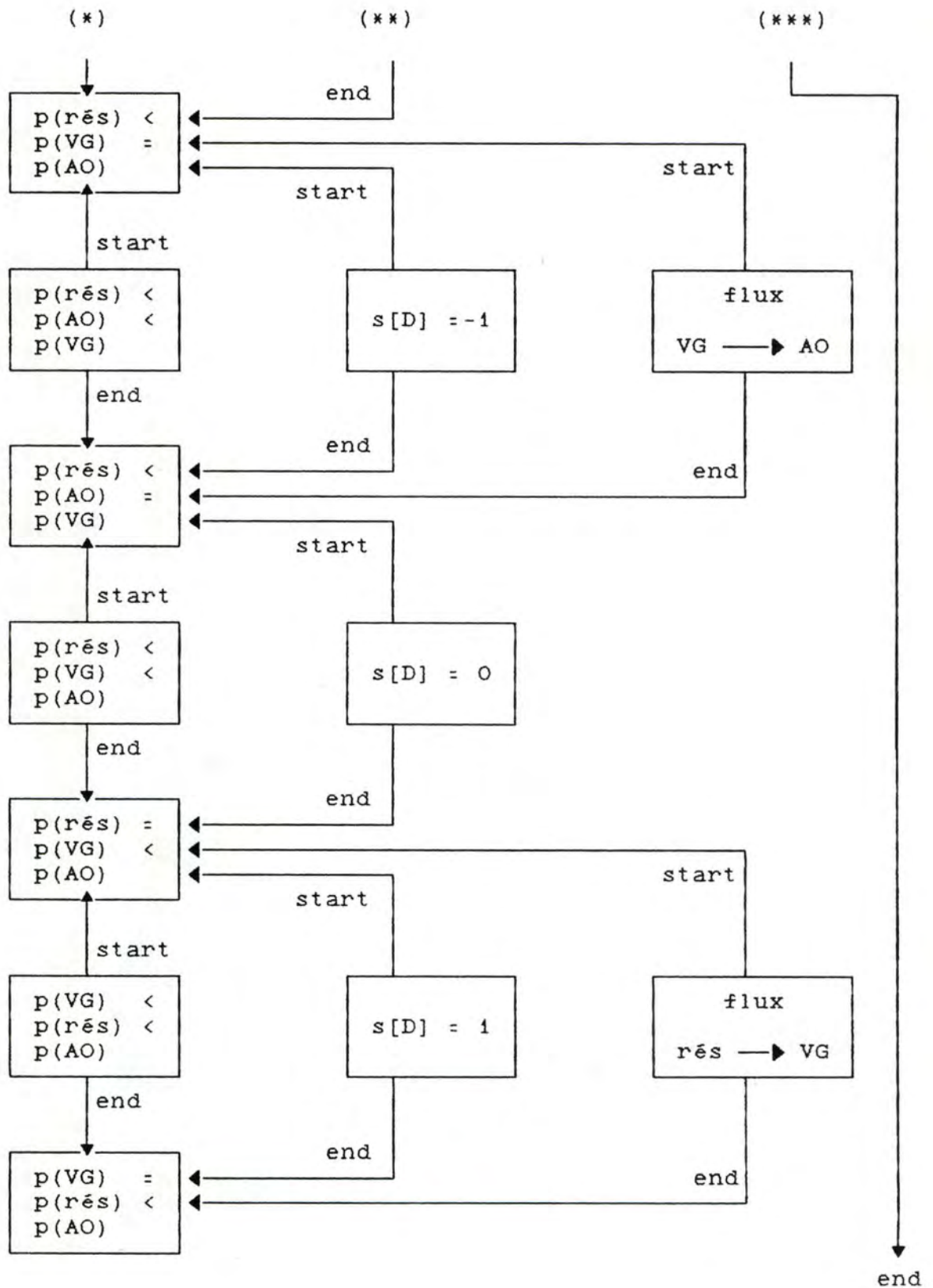
Ex: Pour former l'histoire totale du VG, l'histoire des paramètres du VG (vue au point 3.3.1.E) doit être complétée par l'histoire de son processus de flux:

pression(VG)

D(volume, VG)

flux de fluide







### 3.3.5 RAISONNEMENT CAUSAL

Quand nous pensons que "A cause B", nous croyons que si nous voulons que B arrive, nous devons provoquer A, et si nous voyons que B arrive, alors A pourrait en être la cause. Ceci revient à définir une causalité entre A et B, c'est-à-dire un ordre: si dans le système étudié, rien d'autre que A ne peut "causer" B, alors pour que B arrive, il faut nécessairement que A arrive. Un tel raisonnement est dit causal.

Lorsque l'on veut générer des explications sur le comportement d'un système physique, plusieurs raisonnements sont possibles. Cependant, on remarque que l'expert n'utilise que les raisonnements de type causal. Par exemple, en physique classique, les relations entre quantités sont souvent spécifiées par des équations de contraintes: dans le cas d'un flux de fluide, l'équation

$$T = P1 / P2$$

définit une contrainte entre les paramètres T (taux de flux), P1 (pression de la source) et P2 (pression de la destination). Une telle équation peut être utilisée de plusieurs manières:

- connaissant P1 et P2, nous pouvons déterminer T,
- connaissant T et P1, nous pouvons déterminer P2 et
- connaissant T et P2, nous pouvons déterminer P1.

Cependant, l'expert n'utilisera pas cette équation d'une manière quelconque: seules certaines directions de flux d'information correspondent aux changements causals. Selon les connaissances qu'il a dans le domaine étudié (sens commun), il choisira une des manières possibles d'utiliser l'équation. Ceci revient à définir une causalité entre les paramètres de l'équation, c'est-à-dire à imposer un ordre entre ces paramètres.

Pour déterminer la manière dont il faut utiliser une équation dans un raisonnement causal, Forbus propose l'hypothèse suivante de direction de la causalité:

"Les changements dans les situations physiques qui sont perçus comme causals selon notre interprétation correspondent aux changements directs causés par les processus ou par propagation de ces effets directs à travers les dépendances fonctionnelles."

Par l'hypothèse du mécanisme unique (point 3.3.2 B), les processus sont les seuls mécanismes qui causent les changements dans les systèmes physiques. Tout changement doit donc être la conséquence directe ou indirecte d'un ou plusieurs processus. Les quantités pouvant être directement influencées par un processus sont dites "indépendantes" car nous pouvons provoquer leur changement via des processus actifs. Toutes les autres quantités ne peuvent être changées qu'indirectement suite aux changements que les processus font sur les quantités indépendantes; elles sont dites "dépendantes". Comme par hypothèse (point 3.3.2 B), aucune quantité n'est influencée à la fois directement et indirectement, la distinction entre les quantités dépendantes des quantités indépendantes ne pose pas de problème.



Ex: Les volumes de la source et de la destination d'un flux de fluide sont des quantités indépendantes car ils sont directement influencés par le taux de flux:

I+ (volume(dst), A[taux-flux])

I- (volume(src), A[taux-flux])

Par contre, leurs pressions sont des quantités dépendantes puisqu'elles ne sont influencées par aucun processus mais par d'autres quantités (les volumes correspondant):

pression(dst)  $\propto$  volume(dst)

pression(src)  $\propto$  volume(src).

Tout changement parmi ces pressions ne peuvent donc qu'être que la conséquence d'un changement dans les volumes.

Dès lors, pour trouver la (les) cause(s) d'un changement d'une quantité indépendante, il suffit de repérer les processus actifs agissant sur cette quantité. Pour trouver celle(s) d'une quantité indépendante, il faut regarder les dépendances fonctionnelles, rassembler les quantités dépendantes ou indépendantes dont est fonction cette quantité et rechercher la cause des changements survenants sur ces quantités. Ceci correspond aux deux types de résolution vues au point 3.3.3 C:

- résolution des influences directes;
- résolution des influences indirectes.

Si l'on admet l'hypothèse de causalité de Forbus, la méthode de raisonnement qu'il propose est donc bien de type causal.

Ex: Soit la confluence (voir point 3.1)

$$\partial A - \partial B - \partial C = 0 ,$$

si on sait que:

- $\partial A = +$  (ou ce qui est l'équivalent dans la théorie de Forbus:  $s[D(A)] = 1$  );
- A est une quantité indépendante influencée directement par un processus P1;
- B est une quantité indépendante influencée directement par un processus P2;
- P1 est actif et P2 est inactif;

comment propager la conséquence du changement de A sur les quantités B et C?



### 1) De Kleer

Lorsque l'on ne connaît rien sur les dérivées d'une quantité, l'hypothèse la plus sûre est de supposer que cette quantité ne change pas. Cependant, pour résoudre sa confluence, De Kleer ne peut supposer à la fois que  $\partial B$  et  $\partial C$  sont nuls. Le problème est donc de déterminer sur quelle quantité, B ou C, faire cette hypothèse de stabilité. Deux raisonnements sont donc possibles:

- a) soit on suppose que C est stable, alors le changement de A provoque l'augmentation de B;
- b) soit on suppose que B est stable, alors le changement de A provoque l'augmentation de C.

### 2) Forbus

De la théorie qualitative des processus, on déduit que:

- A augmente parce qu'elle est directement influencée par le processus actif P1;
- B étant une quantité indépendante, elle ne peut être influencée par l'augmentation de A:

"aucune quantité ne peut à la fois être influencée directement et indirectement" ;

B ne peut donc changer que si P2 est actif, ce qui n'est pas le cas. L'hypothèse de stabilité doit donc forcément s'appliquer qu'à B et le raisonnement causal est le suivant:

l'augmentation de A provoque l'augmentation de C

Nous voyons qu'avec De Kleer, deux raisonnements différents sont possibles. Dans certains cas, ces raisonnements peuvent tous deux être corrects mais parfois, un d'eux peut être absurde. Par contre, avec Forbus on obtient directement le bon raisonnement s'il n'y en a qu'un. (Pour un exemple plus précis, voir [4]).

### 3.4 APPROCHE DE KUIPERS

#### 3.4.1 INTRODUCTION

Nous avons vu que la physique qualitative ne travaille pas directement sur les valeurs numériques des paramètres d'un système physique, mais sur une description symbolique appelée "espace de quantité". Deux types d'espace de quantités différents ont déjà été envisagés jusqu'ici. Kuipers en propose encore un troisième. Celui-ci se caractérise par le fait suivant : les paramètres du système physique sont décrits à tout instant par

- un ensemble de relations ordinales entre leurs valeurs;
- la direction de leur changement.

Mais avant de parler de la description des valeurs des paramètres, nous commençons par préciser le vocabulaire utilisé par Kuipers

Paramètre : terme correspondant à une fonction du temps à valeur réelle.

Valeur : terme correspondant à un nombre réel, valeur numérique d'un paramètre à un point particulier dans le temps.

Switch : terme correspondant à une fonction du temps à valeur booléenne.

Booléen : terme correspondant à une valeur booléenne d'un switch à un moment donné.

Valeur incrémentale qualitative : terme correspondant au signe de la dérivée d'un paramètre à instant donné. Il y a trois valeurs possibles : dec ( décroissant ), std ( stable ) et inc ( croissant ).

Kuipers utilise aussi ce qu'il appelle des valeurs-limites. Ce sont des valeurs spéciales intervenant au cours d'une simulation qualitative. Elles servent à mettre en évidence des comportements particuliers qui se manifestent lorsqu'elles sont atteintes par les valeurs de certains paramètres.

#### 3.4.2 LA REPRESENTATION DU TEMPS

Un mécanisme évolue continuellement au cours du temps. Cependant la description qualitative du comportement de celui-ci peut ne pas varier durant un certain espace de temps. L'idée est de découper le temps en intervalles ( et en points ) disjoints durant lesquels la description du comportement ne varie pas. On y fait correspondre ce que Kuipers appelle des points temporels.



### 3.4.3 L'ESPACE DE QUANTITE

Kuipers constitue son espace de quantité en se servant des prédicats suivants :

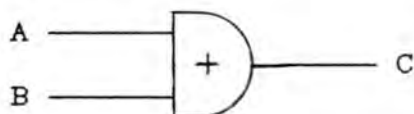
- **assertion ordinale** : ( $\langle \text{rel} \rangle \langle \text{valeur} \rangle \langle \text{valeur} \rangle$ ) ;  
"rel" peut avoir les valeurs suivantes : "inférieur-à", "égal-à" et "supérieur-à". Ce prédicat indique la relation existant à un certain moment entre les valeurs de deux paramètres.
- **assertion incrémentale** :  
(  $\text{IQ} \langle \text{valeur} \rangle \langle \text{valeur-incrémentale-qualitative} \rangle$  ). Ce prédicat associe à une valeur son incrément qualitatif.
- **assertion d'une constante** : (  $\text{constant} \langle \text{valeur} \rangle$  ). Ce prédicat indique que cette valeur ne change à aucun moment dans le temps.

**rem** : L'ensemble des valeurs partiellement ordonné par la fermeture transitive des relations ordinales est appelé par Kuipers, "**Espace des valeurs**".

### 3.4.4 LES CONTRAINTES

L'évolution des paramètres et des switches est soumise à un certain nombre de contraintes. Parmi celles-ci, il y a, les contraintes arithmétiques, les contraintes de relation fonctionnelle, les contraintes-dérivées, les contraintes d'inégalité et les contraintes conditionnelles.

**Les contraintes arithmétiques** : Elles recouvrent les contraintes d'addition et de multiplication. Nous aborderons uniquement l'évaluation des contraintes d'addition à titre exemplatif.

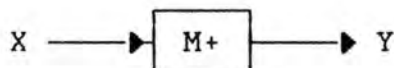


Il existe des règles pour propager les relations ordinales ainsi que les assertions sur les incréments qualitatifs aux travers de ce type de contrainte. En voici quelques unes :

$$\begin{array}{lll} A = 0 & \Longleftrightarrow & B = C \\ B = 0 & \Longleftrightarrow & A = C \\ A > 0 & \Longleftrightarrow & B < C \\ A < 0 & \Longleftrightarrow & B > C \\ B > 0 & \Longleftrightarrow & A < C \\ B < 0 & \Longleftrightarrow & A > C \end{array}$$

Remarquons que si l'on sait que  $A > 0$  et que  $B < 0$ , ces relations impliquent que  $B < C < A$ . Cependant on ne peut pas déduire si  $C$  est positif ou négatif. Ceci requiert de l'information sur les valeurs absolues de  $A$  et  $B$ .

**Les contraintes de relation fonctionnelle** : Si une telle contrainte est appliquée à deux paramètres, cela signifie que ceux-ci sont reliés entre eux par une fonction soit monotone croissante ( $M+$ ), soit monotone décroissante ( $M-$ ). On peut également imposer que leurs "zéros" coïncident ( $Mz+$  et  $Mz-$ ).



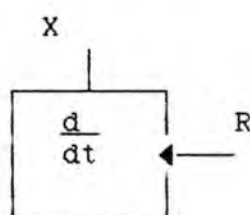
Les règles pour propager les relations ordinales sont les suivantes.

$$\begin{array}{lll}
 X < 0 & \Longleftrightarrow & Y < 0 \\
 X = 0 & \Longleftrightarrow & Y = 0 \\
 X > 0 & \Longleftrightarrow & Y > 0
 \end{array}$$

**Les contraintes-dérivées** : Il s'agit en fait de contraintes entre la valeur d'un premier paramètre et la valeur qualitative d'un second. Les règles de propagation sont les suivantes :

$$\begin{array}{lll}
 R > 0 & \Longleftrightarrow & IQ(X) = \text{inc} \\
 R = 0 & \Longleftrightarrow & IQ(X) = \text{std} \\
 R < 0 & \Longleftrightarrow & IQ(X) = \text{dec}
 \end{array}$$

Graphiquement cette contrainte est représentée ainsi :



**Les contraintes d'inégalité** : Ces contraintes sont établies entre deux paramètres et un switch. Les règles de propagation sont les suivantes. Soient les paramètres  $A$  et  $B$  et le switch  $b$ :

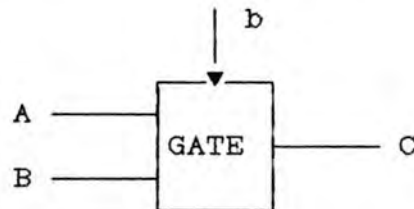
$$\begin{array}{lll}
 A > B & \implies & b = \text{True} \\
 A = B & \implies & b = \text{False} \\
 A < B & \implies & b = \text{False}
 \end{array}$$



**Les contraintes conditionnelles :** Ces contraintes sont également appelée "gachette". Soient les paramètres A B et C, soit le switch b ; Ces contraintes intègrent l'expression suivante :

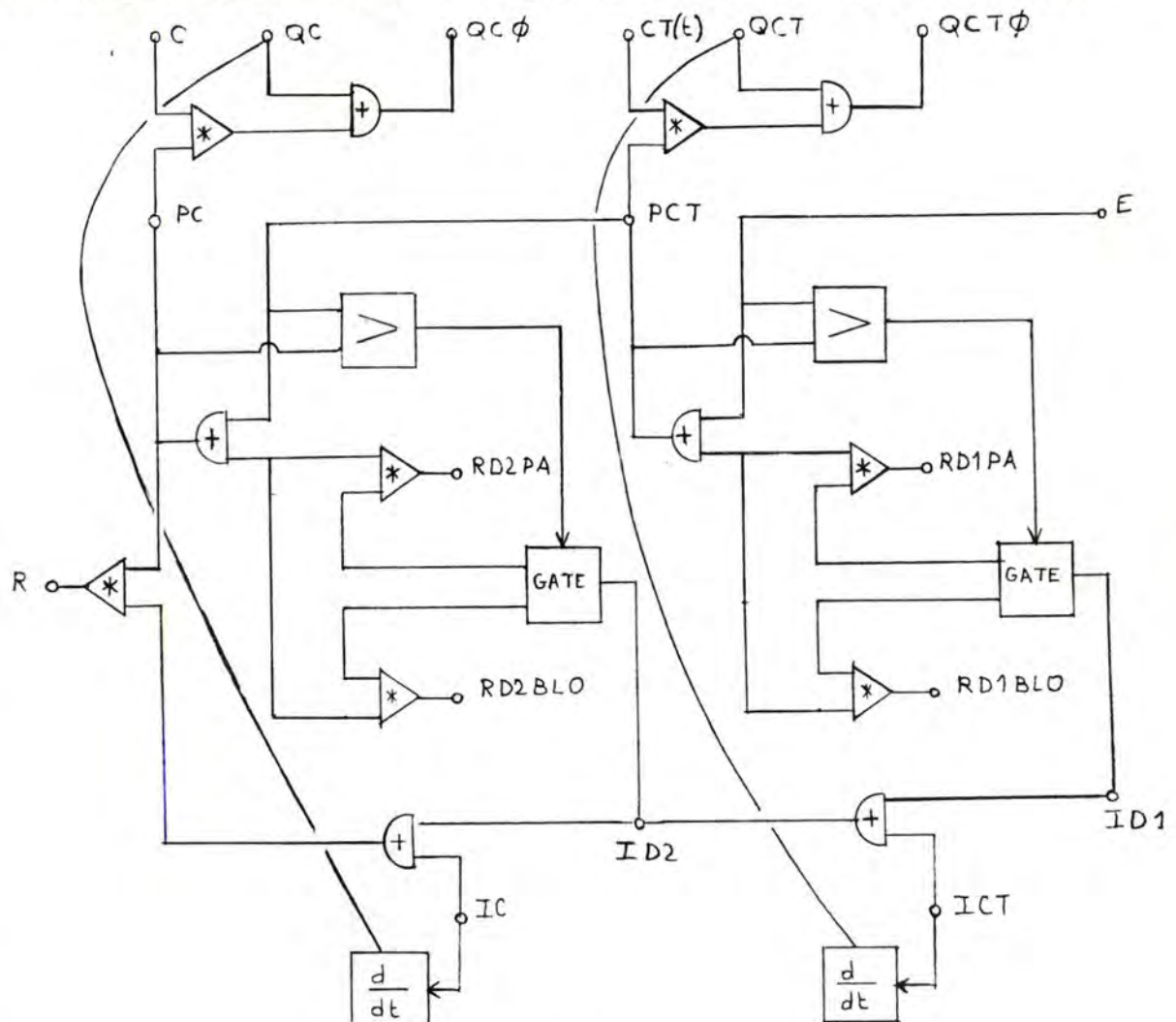
IF b = True THEN C = A ELSE C = B ;

On peut leurs donner cette représentation graphique :



### 3.4.5 EXEMPLE DE DESCRIPTION DE STRUCTURE

Kuipers considère que la description structurelle d'un dispositif physique est constituée des paramètres qui caractérisent ses composants, ainsi que des interactions entre ceux-ci exprimées en termes de contraintes sur les paramètres. Il exprime ainsi la structure d'un dispositif sous la forme réseau de contraintes. Pour illustrer ceci, nous avons graphiquement reproduit le réseau de contraintes correspondant à l'exemple du modèle électrique du ventricule gauche isolé.



### **3.4.6 PRÉDICTION DU COMPORTEMENT**

La description du comportement consiste en un ensemble fini de points temporels représentant les états qualitativement distincts du système et les valeurs pour chaque paramètre à chaque point temporel.

Le processus permettant de déterminer le comportement d'un système s'exécute selon un cycle de propagation/prédiction. La **phase de propagation** part d'informations initiales connues sur l'état du système au point temporel courant et propage ces informations à travers les contraintes de la description structurelle du dispositif afin de créer une description qualitative plus complète. Le point temporel courant est complet lorsque le signe de la dérivée (direction du changement) pour chaque valeur est connu. Les règles permettant la propagation de l'information initiale ont été présentées au point 3.4.4.

La **phase de prédiction** examine les valeurs changeantes pour déterminer les changements de l'espace de quantité pouvant conduire à un état suivant qualitativement distinct. Pour chaque nouvel état possible, on définit un nouveau point temporel auquel on associe les changements conduisant à cet état. Ces modifications de l'espace de quantité constitue l'information à propager lors de la phase de propagation afin d'obtenir une description complète de l'état au nouveau point temporel.

Kuipers définit trois types de changements qualitatifs possibles:

#### **1) Changement à partir d'une valeur limite:**

Si la valeur courante d'un paramètre est égale à une valeur limite et si ce paramètre augmente (diminue), alors sa prochaine valeur sera supérieure (inférieure) à la valeur limite et plus proche de cette valeur limite que de toute autre valeur.

#### **2) Changement vers une limite:**

Si la valeur courante d'un paramètre changeant n'est pas égale à une valeur limite dans la direction du changement, alors la valeur de ce paramètre au prochain point temporel sera égale à cette valeur limite.

#### **3) Collision:**

Si deux valeurs changeantes, non égales à des valeurs limites et non séparées par des valeurs limites, se déplacent l'une vers l'autre, leurs prochaines valeurs seront égales et représentées par un point limite.

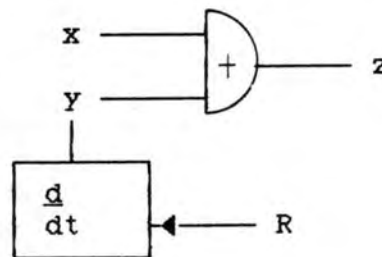


Les règles de prédictions de Kuipers constituent une implémentation de ces trois définitions. Lorsque la description de l'état courant du système n'est pas suffisamment complète que pour déterminer le prochain état de manière unique, la simulation se divise sur les états possibles d'une valeur IQ particulière ou d'une relation ordinale. Afin de limiter le nombre de branchements à effectuer, il est parfois possible de simplifier la structure du dispositif. Celle-ci s'effectue à l'aide de règles dont nous donnons ici quelques exemples:

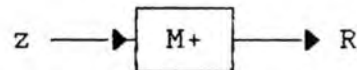
- Contrainte arithmétique avec une constante:

$$x + y = z \quad \& \quad \text{constant}(y) \implies z = M+(x)$$

soit la structure

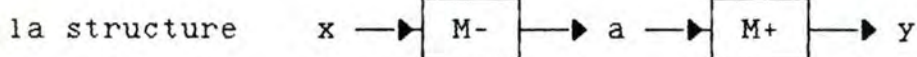


si  $R = 0$ , alors cette structure peut être remplacée par la suivante:

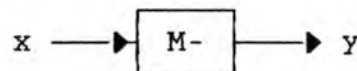


- Composition de contraintes fonctionnelles:

$$y = M-(M+(x)) \implies y = M-(x), \text{ c'est-à-dire que}$$



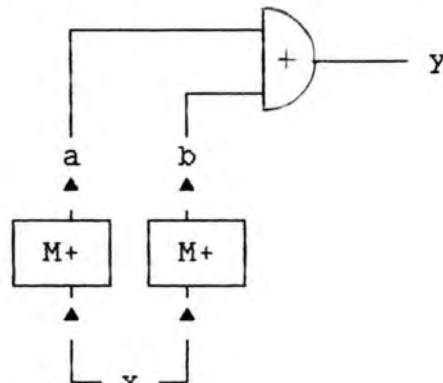
peut être remplacée par celle-ci:



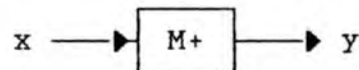
- Somme de contraintes fonctionnelle avec même effet net:

$$y = M+(x) + M+(x) \implies y = M+(x) , \text{ c'est-à-dire que}$$

la structure



peut être remplacée par:



Ce genre de simplification peut permettre dans certains cas de déterminer de manière non ambiguë le prochain état du dispositif. Par exemple, dans la dernière structure ci-dessus, la simplification permet de tirer des renseignements sur  $y$  même si l'on ne sait rien sur  $a$  et  $b$ ; selon les règles de propagation dans une contrainte fonctionnelle, il suffit pour cela de connaître soit la valeur de  $x$  (cas de  $M$ ) ou bien celle de  $IQ(x)$  (cas de  $Mz$ ).



## CHAP 4. LES FONCTIONS DU SYSTEME

### 4.1 INTRODUCTION

Lors du développement d'une application informatique, le premier pas consiste à spécifier les données et les traitements que celle-ci devra effectuer. Ce n'est que par la suite que l'on pourra entamer la mise en oeuvre proprement-dite. Dans notre cas, nous nous sommes assigné l'analyse du développement d'un système capable "d'expliquer" comment fonctionne un dispositif physique. Il faut tout d'abord préciser ce que l'on entend par "expliquer". Quels sont les types de raisonnement que le système devra générer? La première étape vers la construction d'un tel système consiste tout naturellement à identifier le type de raisonnement qu'un être humain souhaite, lorsqu'il désire comprendre ou faire comprendre le fonctionnement d'un dispositif physique. Cette identification nécessite l'observation d'un expert humain et l'analyse de ses raisonnements. Cette première étape a été effectuée en assistant à des séances de travaux pratiques données par J. Lefèbvre, chef de travaux aux facultés de médecines à l'UCL ( Saint-Luc ). Nous y avons observé un expert expliquant à des étudiants le fonctionnement du système cardiaque, celui-ci étant compris comme une "machine", ou si l'on préfère, un dispositif physique. Nous avons pu dégager quatre phases dans le déroulement des explications :

- Présentation des composants du modèle ;
- Présentation et explication de l'évolution du comportement du dispositif au cours du temps ;
- Analyse du comportement du dispositif réagissant à une perturbation, ou à une modification de ses constantes ;
- Mise en évidence de caractéristiques générales du comportement du dispositif ;

Nous allons ci-dessous expliciter ces quatre phases et tenter de dégager les fonctions du système, c'est-à-dire les types d'explications que celui-ci devrait idéalement pouvoir générer.

### 4.2 PRESENTATION DES COMPOSANTS DU MODELE

L'objectif de cette phase est de présenter le comportement de chaque composant individuel. Par exemple, un ventricule est modéliser comme un "sac élastique" dont l'élasticité est commandée par le système nerveux central. On a ensuite décrit les relations entre les différents paramètres du ventricule. Il a été procédé de la même manière avec les autres composants tels que les valves, les capillaires, l'aorte...



Si on examine cette phase plus attentivement, on constate que cette phase a en fait servi à introduire les hypothèses de modélisation. On a par exemple fait l'hypothèse que la contraction du ventricule se faisait de manière uniforme sur toute sa surface. On a supposé que l'aorte se comportait comme un gros tuyau élastique sans frottement et que les valves ne provoquaient aucune turbulence. On a supposé que l'on pouvait négliger l'inertie du sang et que l'on pouvait négliger l'effet de la pesanteur... L'ensemble de ces hypothèses peut être repris sous le nom d'hypothèses constitutives de la classe du dispositif. Un système expert qui utiliserait l'interprétation de modèles, que ce soit à des fins cliniques ou pédagogiques devrait être capable d'explicitier les hypothèses de modélisation. En effet, celles-ci constituent la justification ultime des raisonnements du systèmes. Par ailleurs, en cas de désaccord avec la réalité, c'est parmi ces hypothèses qu'il faudra enquêter. Nous n'avons pas cherché à approfondir ce problème, néanmoins capital, nous limitant exclusivement à la génération des raisonnements.

#### 4.3 EVOLUTION DU COMPORTEMENT DU DISPOSITIF

La seconde phase de l'explication du fonctionnement du dispositif consiste à présenter et justifier l'évolution de son comportement à travers le temps. Nous avons reproduit un exemple de raisonnement illustrant cette phase.

On suppose que la compliance du ventricule est constante ( diastole ). La pression du ventricule est inférieure à la pression de l'aorte. La valve aortique est donc fermée. La pression de la source est supérieure à la pression du ventricule. La valve mitrale est donc ouverte. Puisque la valve aortique est fermée et que la valve mitrale est ouverte, le ventricule se remplit lentement et son volume augmente ainsi que sa pression. Par ailleurs, comme la valve aortique est fermée, et que la résistance des capillaires est élevée, l'aorte se dégonfle lentement et sa pression diminue.

A un certain moment, on fait diminuer la compliance du muscle cardiaque. Il se contracte et comme la pression du ventricule devient supérieure à la pression de la source, la valve mitrale se ferme. Comme toutes les valves sont fermées on aura donc une compression iso-volumétrique.

La pression du ventricule augmente et finit par rattrapper la pression de l'aorte, ce qui provoque l'ouverture de la valve aortique. Le ventricule commence à éjecter dans l'aorte. Comme on continue à faire diminuer la compliance du ventricule et que la résistance des capillaires est élevée, le débit de l'aorte est inférieur au débit du ventricule. Le volume du ventricule commence donc à augmenter et sa pression également.



Comme le ventricule rencontre un obstacle de plus en plus fort et que par ailleurs, on peut de moins en moins diminuer la compliance du muscle cardiaque, la pression du ventricule et de l'aorte vont finalement atteindre un maximum et diminuer. La diminution de la compliance ne servira plus qu'à faire du débit et non de la pression.

Notre travail s'est concentré exclusivement sur la génération automatique de raisonnements équivalents à celui-ci ( mais plus formels ). C'est ainsi que nous nous sommes attachés à la réalisation d'un simulateur qualitatif, capable de prévoir le comportement d'un dispositif physique à partir d'une description de sa structure. Soulignons qu'un simulateur qualitatif peut donner naissance à plusieurs futurs possibles. La simulation qualitative et la justification des états obtenus constituent une fonction indispensable à un système basé sur l'interprétation de modèles.

A cette fonction, il faut encore ajouter les deux suivantes. Il y a tout d'abord la comparaison du comportement du dispositif durant deux épisodes successifs. Un épisode est ici compris dans le sens que lui a attribué De Kleer, c'est-à-dire intervalle de temps durant lequel la description qualitative du dispositif ne varie pas. La fonction suivante concerne la comparaison de deux cycles successifs, par exemple deux battements cardiaques. Ce problème est extrêmement complexe. Il doit notamment, prendre en compte la comparaison de valeurs moyennes, de valeurs intégrées. Il est par exemple extrêmement utile de savoir que le volume éjecté par le ventricule durant un cycle, est en train de diminuer...

#### 4.4 ANALYSE DES REACTIONS DU SYSTEME FACE AU CHANGEMENT

Durant la troisième phase des explications, diverses perturbations ou modifications des constantes du dispositif ont été introduites. Modifier une caractéristique d'un composant du dispositif semble être une très bonne méthode pour comprendre l'influence de celle-ci sur le comportement global. Voici quelques exemples de perturbations effectuées au cours des séances de travaux pratiques :

- Modification de la résistance des capillaires ( vaso-constriction, vaso-dilatation ) ;
- Modification de la raideur de l'aorte ;
- Simulation d'une sténose ou d'une insuffisance d'une valve en modifiant sa résistance lorsqu'elle est ouverte ou fermée ;
- Modifier la pression de remplissage ( dans le cas du ventricule gauche isolé ) ;



- Simulation d'une extrasystole ( par exemple, suite à une injection de calcium dans les coronaires ) en augmentant la valeur de l'élastance systolique maximale ;

Pouvoir analyser une perturbation est très intéressant pour un système à vocation pédagogique, mais pour un système à usage clinique, ceci est indispensable. Nous avons rassemblé un certain nombre de fonctions qu'un tel système devrait pouvoir effectuer pour analyser les réactions du dispositif face au changement. Ces fonctions consistent essentiellement en une comparaison entre d'une part une situation initiale, et d'autre part, ses futurs possibles avec perturbation et sans perturbation de la situation initiale ainsi qu'une comparaison entre d'une part les futurs possibles avec perturbation de la situation initiale et d'autre part, les futurs possibles sans perturbation de la situation initiale. Une première fonction serait dédiée aux comparaisons entre épisodes, une seconde s'occuperait des comparaisons entre cycles successifs. On peut éventuellement en ajouter une troisième: étant donné une situation initiale, comparer la suite des épisodes futurs avec et sans perturbation.

#### 4.5 CARACTERISTIQUES GENERALES DU COMPORTEMENT DU DISPOSITIF

Dans cette dernière phase, on s'intéresse cette fois au comportement global du dispositif. On ne cherche plus à décrire ce qui se passe pas-à-pas, mais bien à mettre en évidence certaines caractéristiques générales du comportement du dispositif, par exemple, des cycles, des oscillations éventuellement amorties. Certains dispositifs peuvent manifester un comportement particulièrement stable suite à des mécanismes de régulation tel que des feed-backs, des effets "tampons"... C'est particulièrement le cas en physiologie suite au comportement homéostatique de la plupart des organes. La détection et la justification de ces effets particuliers sont des fonctions dont le développement devrait être envisagé.

#### 4.6 CHOIX D'UNE FONCTION A DEVELOPPER

Le développement d'un système, doté de toutes les fonctions précitées, constitue de toute évidence un travail absolument énorme. Néanmoins, malgré l'étendue du problème, nous pensons qu'il est possible d'y apporter un jour une solution. Nous avons tenté l'implémentation d'une fonction de base, le simulateur qualitatif, afin de prouver la faisabilité d'une telle démarche.



## CHAP 5 ANALYSE THEORIQUE DU SIMULATEUR QUALITATIF

### 5.1 INTRODUCTION

Comme nous avons pu le constater au chapitre III, il n'existe pas de formalisme unique en physique qualitative pour modéliser le réel perçu, c'est-à-dire modéliser les dispositifs physiques. En particulier, il n'existe pas de méthode de description unique des grandeurs physiques observables.

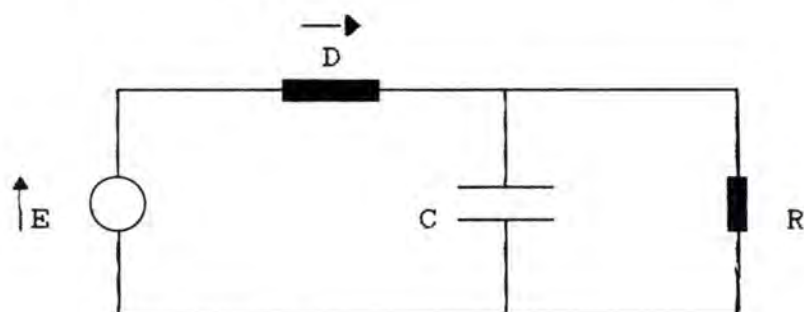
L'analyse conceptuelle propose un certain nombre d'outils pour modéliser le réel perçu, comme par exemple le modèle Entité/Association et le modèle relationnel. Cependant, on constate que ceux-ci sont mal adaptés à la physique qualitative.

Il y a d'abord le problème de la représentation de l'évolution du monde réel. Considérons par exemple, le modèle relationnel: "Représenter l'évolution du monde réel impose de considérer, non plus un domaine (et une relation), mais une suite temporelle de domaines (de relations) de même type..." [Le Modèle Relationnel Généralisé, J-L. Hainaut, Namur, Octobre 1980]. Dans ce cas-ci, il y aurait également des contraintes d'intégrité entre d'une part, les valeurs des domaines et les n-uplets des relations au temps  $t$ , et d'autre part, les valeurs des domaines et les n-uplets des relations au temps suivant  $t'$ . En effet, l'état d'un dispositif est fonction de son état à l'instant précédent.

Plus fondamental est sans doute le problème de l'ambiguïté de l'analyse qualitative. Celle-ci impose la description de plusieurs "mondes parallèles". Chacun de ces mondes serait décrit par un ensemble particulier de n-uplets de relations. Plutôt que d'essayer de "forcer" un des formalismes précédents pour décrire notre structure de données, nous avons préféré en construire un "sur mesure" en récupérant certains concepts déjà développés dans les modèles existants.

Nous décrivons ci-dessous la définition des concepts et la structure des données que nous utilisons.

Pour illustrer les notions présentées, nous nous baserons parfois sur un modèle physique plus simple que celui du ventricule isolé; ceci afin de compliquer les exemples le moins possible. Ce modèle est le suivant:



Les composants de ce modèle que nous appellerons exemple 1 sont:

- E : une source de tension,
- C : une capacité,
- D : une diode,
- R : une résistance.

Les équations le décrivant sont:

$$E = a \sin (w t)$$

$$VC = QC / C$$

$$IR = VC / R$$

$$\begin{aligned} \text{IF } (E > VC) \quad \text{THEN } ID &= (E - VC) / RD(PA) \\ \text{ELSE } ID &= (E - VC) / RD(BLO) \end{aligned}$$

$$IC = ID - IR$$

$$d QC / dt = IC$$

où

VC = différence de potentiel aux bornes de C,  
QC = charge de la capacité C,  
ID = intensité du courant passant par D,  
RD(PA) = résistance passante de ID,  
RD(BLO) = résistance bloquante de  
IR = intensité du courant passant par R,  
IC = intensité du courant passant par C,  
d QC / dt = dérivée première de QC.

## 5.2 DESCRIPTION DE LA STRUCTURE

### 5.2.1 ESPACE DE QUANTITE

Le réel que nous devons modéliser est un système physique composé d'objets tels que des résistances, des capacités,.... Ces objets sont caractérisés par certaines grandeurs (ou paramètres): dans le modèle du ventricule isolé, la valve mitrale est caractérisée par les grandeurs RD1 (PA) (résistance passante), RD1 (BLO) (résistance bloquante) et ID1 (intensité du courant passant par la diode RD1). Lors de l'analyse d'un système, on peut supposer que certaines de ces grandeurs n'évoluent pas avec le temps (RD1 (PA) et RD1 (BLO)). Nous distinguons donc 2 types de paramètres:

- les variables, ou paramètres dépendants du temps,
- les constantes, ou paramètres indépendants du temps.



Nous représentons l'ensemble des grandeurs observables sur un dispositif physique par le domaine-entité "Paramètres". A tout élément de ce domaine sont attachés:

- le nom identifiant ce paramètre, ex: VC, IR, RD1(PA),...
- le type de ce paramètre: "variable" ou "constante"
- la valeur de ce paramètre, valeur représentée par un réel
- l'unité dans laquelle la valeur de ce paramètre est exprimée, ex: Volt pour VC, Ohm pour RD1(PA), Farad pour C, ...

Pour représenter ces propriétés d'un paramètre, nous définissons les **domaines-propriétés**:

- **Noms**: ensemble des noms de paramètres
- **Types**: { variable , constante }
- **Valeurs**: ensemble des valeurs réelles des paramètres
- **Unités**: ensemble des unités physiques,

et les **relations**:

- **Nom**: reliant un paramètre à son nom
- **Type**: reliant un paramètre à son type
- **Valeur**: reliant un paramètre à sa valeur réelle
- **Unité**: reliant un paramètre à son unité.

Dans un système physique, une grandeur peut correspondre à la dérivée d'une autre grandeur, ex:  $dQC/dt = IC$ . Pour représenter une telle caractéristique du système, nous définissons également la relation **Dérivée** associant 2 paramètres dont l'un est égal à la dérivée de l'autre.

Lorsque nous voudrions désigner la dérivée d'un paramètre de nom <par>, nous utiliserons un couple (liste à deux éléments) dont le premier élément est le string "dérivée", le second étant le nom de ce paramètre: (dérivée <par>).

Ex: les dérivées  $dVC/dt$  et  $dIR/dt$  seront désignées respectivement par les couples (dérivée VC) et (dérivée IR)

Nous considérerons toute dérivée comme un paramètre. Dès lors, le second élément de la liste, qui doit être le nom d'un paramètre, peut également être le nom d'une dérivée. Par application récursive de notre définition, nous pouvons obtenir les représentations suivantes de dérivées:

	"représente"	
(dérivée VC)	→	dérivée d'ordre 1 de VC
(dérivée (dérivée VC))	→	" " 2 "
(dérivée (dérivée (dérivée VC)))	→	" " 3 "
.	.	.
.	.	.
.	.	.

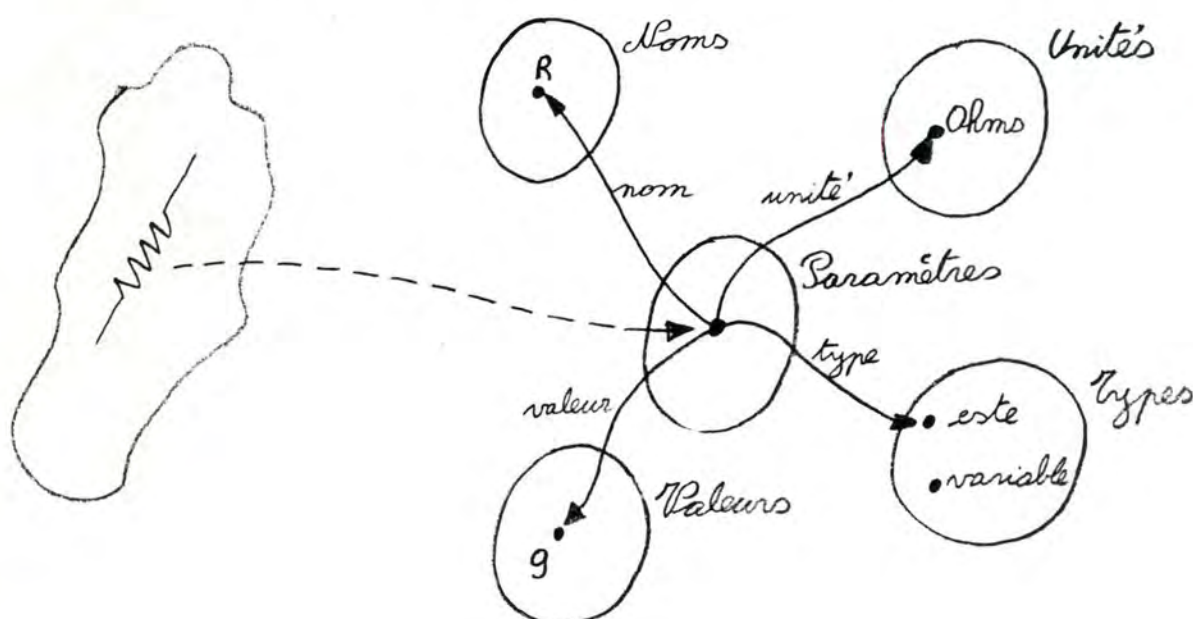
Ceci nous permet représenter toute dérivée d'ordre quelconque d'un des paramètres de notre modèle.

Tableau récapitulatif pour l'exemple 1:

	<u>TYPES DE PARAMETRES</u>		
	Variables	Constantes	Dérivées
E			
VC	*		
QC	*		
ID	*		
IR	*		
IC	*		
C		*	
RD(PA)		*	
RD(BLO)		*	
R		*	
(dérivées VC)	*		*
(dérivée (dérivée VC))	*		*
.			
.			
.			

Dans cette modélisation, on associe à un paramètre une valeur réelle. Nous dirons qu'une telle représentation du réel est **quantitative**.

Réel perçu    Représentation quantitative du réel perçu





En physique qualitative, la valeur réelle n'est pas connue. La connaissance que nous avons du réel perçu ne nous permet pas d'attribuer une valeur numérique aux paramètres. Selon le modèle relationnel, nous ne pouvons donc que leur assigner la valeur  $w$  (inconnu). Néanmoins, nous avons une certaine connaissance sur les grandeurs relatives de ces paramètres. Nous allons donc tenter de décrire l'espace continu des valeurs des paramètres au moyen d'un ensemble restreint de symboles et constituer ainsi un espace de quantité.

Au chapitre III, 3 espaces de quantité différents ont été présentés:

- De Kleer & Brown décrivent leur espace de quantité au moyen d'un ensemble restreint de valeurs qualitatives.
- Forbus représente un paramètre par 4 éléments: le signe et la magnitude du montant de ce paramètre:  $s[A]$  et  $m[A]$ , ainsi que le signe et la magnitude de sa dérivée:  $s[D]$  et  $m[D]$ . L'espace de quantité d'un nombre (dérivée ou montant) ou d'une magnitude est constitué par un ordre partiel (ou total) entre les dérivées et montants des paramètres.
- L'espace de quantité de Kuipers est composé d'une part, d'un ordonnancement entre les valeurs des paramètres, et d'autre part, les signes des dérivées des paramètres.

Après avoir étudié les différents types d'espaces de quantité précités, nous avons décidé d'élaborer une solution personnelle. Nous avons tout d'abord restreint l'espace continu des valeurs des paramètres aux signes de ceux-ci: "négatif", "nul", "positif". Ceci correspond en fait aux valeurs qualitatives de De Kleer. A ces valeurs, nous en avons ajouté une, "inconnu", indiquant que le signe d'un paramètre n'est pas connu. Nous définissons le domaine **Signes** comme l'ensemble de nos valeurs qualitatives d'extension:

{ négatif , nul , positif , inconnu }.

La relation **Signe** associera une valeur du domaine Paramètres à une valeur du domaine Signes.

Néanmoins, nous avons trouvé cet espace de quantité insuffisant. En effet, plus l'information sur un dispositif physique est pauvre, plus son analyse qualitative sera ambiguë. Pour peu que le dispositif physique étudié devienne complexe, le nombre d'interprétations par état qualitatif composite croîtra démesurément. Ceci nous a incité à enrichir l'espace de quantité en lui adjoignant des relations d'ordre entre les magnitudes (valeurs absolues) des paramètres du dispositif physique. Ces relations sont définies ci-dessous:

**Mgn-inf** ( <par-1> <par-2> )  
ssi

<par-1> a une valeur absolue inférieure à celle de <par-2>;

("Mgn-inf" est une abréviation pour "Magnitude-inférieur")



**Mgn-égal** ( <par-1> <par-2> )

ssi

<par-1> a une valeur absolue égale à celle de <par-2>.

Ex:

Mgn-inf ( ID IR )  $\iff$   $|ID| < |IR|$

Mgn-égal ( IC IR )  $\iff$   $|IC| = |IR|$

Rq: 1) Notons que la relation "Mgn-sup" n'a pas été retenue, l'information "Mgn-sup (x y)" pouvant être représentée sous la forme "Mgn-inf (y x)".

2) L'utilité de ces relations entre valeurs absolues apparaîtra lors de la définition de l'évaluation des contraintes (voir point 5.3).

L'espace de quantité ainsi obtenu est plus riche que celui de De Kleer. Par exemple, si nous savons uniquement que ID et IR sont tous deux positifs, il nous est impossible de déterminer sans ambiguïté la valeur de IC qui est égal à  $ID - IR$ . Par contre, si nous connaissons la relation de magnitude existant entre ID et IR, alors le signe de IC peut-être calculé de la manière suivante:

▪ si Mgn-inf (IR ID), alors IC est positif:

$ID > 0, IR > 0, |IR| < |ID| \implies IC > 0$

▪ si Mgn-égal (IR ID), alors IC est nul:

$ID > 0, IR > 0, |IR| = |ID| \implies IC = 0$

▪ si Mgn-inf (ID IR), alors IC est négatif:

$ID > 0, IR > 0, |ID| < |IR| \implies IC < 0$

L'ensemble des n-uplets:

- Signe (<par-i> <signe>),.... de la relation Signe
- Mgn-inf (<par-i> <par-j>),.... de la relation Mgn-inf
- Mgn-égal (<par-k> <par-l>),.... de la relation Mgn-égal

nous donne une image du réel composé des paramètres  $i, j, k, l, \dots$ . Un tel ensemble de relations d'ordre décrivant la situation du réel à un moment donné sera appelé une S-description ("S" pour système). Une S-description sera dite complète si elle renferme un couple de la relation Signe pour chaque paramètre du système, c'est-à-dire si elle décrit le signe de tous les paramètres; dans les autres cas, elle sera incomplète. Notre espace de quantité sera défini par la suite temporelle des S-descriptions complètes du système.



### 5.2.2 CONTRAINTES

Les paramètres, leurs propriétés et les relations auxquelles ils peuvent participer étant précisés, nous pouvons définir des contraintes sur ces paramètres.

#### A) Contraintes arithmétiques

Les équations de l'algèbre traditionnelle impose des contraintes sur les valeurs numériques des paramètres. Par exemple, l'équation  $IC = ID - IR$  impose une contrainte entre les paramètres IC, ID et IR:

si les valeurs de ID et IR sont fixées et valent respectivement 9 et 6, alors la valeur de IC est contrainte et doit valoir 3.

Par contre, dans notre algèbre qualitative, on impose des contraintes sur les relations constituant l'espace de quantité dans lesquels interviennent ces paramètres:

soit IR négatif et ID positif, alors IC doit être positif, puisque  $IR < 0$ ,  $ID > 0$  et  $IC = ID - IR \Rightarrow IC > 0$ .

Nous introduisons certaines notations pour faire la distinction entre les opérateurs algébriques et nos opérateurs qualitatifs. Voici un tableau établissant la correspondance avec l'algèbre traditionnelle:

opérateur algébrique	opérateur qualitatif	algèbre traditionnelle	représentation qualitative
+	somme	$a + b$	somme (a b)
-	différence	$a - b$	différence (a b)
*	produit	$a * b$	produit (a b)
/	division	$a / b$	division (a b)
-	moins	-a	moins (a)
=	égal	b	égal (b)

Toute équation algébrique de la forme:

$\langle \text{résultat} \rangle = [ [ \langle \text{opérande-1} \rangle ] \langle \text{opér-alg} \rangle ] \langle \text{opérande-2} \rangle$ ,

sera représentée par l'expression:

$( \langle \text{résultat} \rangle \langle \text{opér-qual} \rangle ( [ \langle \text{opérande-1} \rangle ] \langle \text{opérande-2} \rangle ) )$

où  $\langle \text{opérande-1} \rangle$  et  $\langle \text{opérande-2} \rangle$  sont des variables ou des constantes,  
 $\langle \text{résultat} \rangle$  est une variable,  
 $\langle \text{opér-alg} \rangle$  est un opérateur algébrique,  
 $\langle \text{opér-qual} \rangle$  est l'opérateur qualitatif correspondant à  $\langle \text{opér-alg} \rangle$ ,  
" [ ] " marque l'aspect facultatif de  $\langle \text{opérande-1} \rangle$  et  $\langle \text{opér-alg} \rangle$

Toute équation de la forme:

<résultat> = <opérande>

sera représentée par l'expression:

( <résultat> égal (<opérande>) )

Nous définissons une contrainte arithmétique comme une des deux expressions décrites ci-dessus. Une contrainte arithmétique est donc une expression d'un des deux types suivant:

( <résultat> <opér-qual> (<opérande-1> [<opérande-2>]) )

( <résultat> égal (<opérande>) )

Ex:

Equations

Contraintes

	représentation	
VC = QC / C	→	VC division (QC C)
IC = IR1 - IR2	→	IC différence (IR1 IR2)



## B) Contraintes conditionnelles

Parfois, la structure d'une partie du système ne peut s'exprimer par une liste unique de contraintes: selon qu'une certaine condition est satisfaite ou non, la structure est décrite par l'une ou l'autre liste de contraintes.

Ex: dans le cas du ventricule isolé, l'intensité du débit de sang coulant par la valve mitrale (diode) est définie par l'équation suivante:

```
IF (E > PCT) THEN ID = (E - PCT) / RD2 (PA)
                ELSE ID = (E - PCT) / RD1 (BLO)
```

Pour pouvoir représenter une telle structure dans un système, nous définissons une contrainte conditionnelle: c'est une expression du type:

```
IF <condition> THEN <liste-contraintes-1>
                ELSE <liste-contraintes-2>
```

où

```
<condition> := <condition-simple> [ |ET| <condition> ]
                                     |OU|
```

```
<condition-simple> := | Signe (<paramètre-0> <sgn>) |
                       | <nom-relation> (<paramètre-1><paramètre-2>) |
```

<sgn> ∈ Signes

<paramètre-1> ∈ Paramètres

```
<nom-relation> := | Mgn-inf |
                  | Mgn-égal |
```

<liste-contraintes-1> = <l-contr>

<liste-contraintes-2> = <l-contr>

```
<l-contr> = ( | <contrainte-arithmétique> |
              | <contrainte-conditionnelle> | ; [<l-contr>] )
```

Rq: L'expression entre barres verticales  $\begin{array}{c} | x | \\ | y | \end{array}$  signifie:  
"soit x, soit y".



### C) Contraintes constitutives

La démarche de modélisation de la structure d'un dispositif physique que nous avons adoptée comprend deux étapes. Tout d'abord, nous identifions les composants de ce dispositif et nous donnons une description de leur comportement individuel. Nous définissons ensuite la "topologie" du dispositif, c'est-à-dire les interconnexions ou interactions entre les composants. Remarquons d'emblée que cette démarche n'est pas générale. Tout dispositif physique ne s'y prête pas, en l'occurrence les dispositifs physiques à paramètres répartis.

Pour décrire la topologie d'un dispositif, nous avons choisi un formalisme particulier : les graphes de liaison [voir annexe A]. Ce formalisme est en fait très polyvalent. Il s'adapte tout aussi bien aux circuits électriques et hydrauliques qu'en thermodynamique. Il trouve même des applications ( pas très "naturelles", cependant ) en cinétique chimique et enzymatique.

Nous avons néanmoins opéré une restriction parmi les dispositifs dont nous nous proposons d'analyser le comportement, en nous limitant aux dispositifs physiques dont le graphe de liaison peut être augmenté en graphe de liaison causal. Cette restriction peut paraître importante, mais il n'en est rien. Les experts s'accordent à dire que si l'on n'arrive pas à déterminer un graphe de liaison causal, c'est généralement l'indice d'une trop grande simplification dans le modèle. On peut donc traiter à l'aide de ce formalisme une large classe de dispositifs.

Une des deux étapes de la modélisation de la structure d'un dispositif consiste à décrire le comportement de ses composants. Dans le chapitre III, nous avons vu que De Kleer modélisait le comportement des composants du dispositif au moyen des confluences et des états qualitatifs. Nous ne pouvons adopter cette démarche car notre espace de quantité est plus riche et ne tolère pas la perte d'information résultant de la transformation d'équations de la physique traditionnelle en confluences. En effet, les confluences ne permettent que la propagation du signe des variables.

Nous avons donc adopté une démarche analogue à celle de Kuipers en conservant tel quelles les équations de la physique classique décrivant le comportement d'un composant. Cependant, elles seront interprétées par la suite comme des contraintes. Dans notre cas, il s'agira de contraintes sur les n-uplets des relations Signe, Mgn-inf, et Mgn-égal. On peut également exprimer qu'une variable est le résultat d'une fonction appliquée à une autre variable. La seule information dont on dispose sur cette fonction est qu'elle est monotone croissante ( ou décroissante ).

La modélisation des composants est bien sûr soumise au principe de non-fonction dans la structure exprimé par De Kleer, c'est à dire, il est interdit de faire d'autres hypothèses sur le fonctionnement du dispositif que celles comprises dans l'ensemble des hypothèses constitutives de la classe du dispositif.



En physique traditionnelle, lorsque les équations des composants d'un dispositif sont connues ainsi que les connexions entre ceux-ci, tenant compte des lois de connexions, on peut déterminer les équations du dispositif. On appelle ces équations, les équations constitutives du dispositif. Généralement, on obtient ainsi un système d'équations implicites redondant. Cependant, lorsque la topologie du dispositif peut être exprimée sous forme d'un graphe de liaison causal, il est alors possible de générer un ensemble d'équations non-redondant évaluable dans un ordre procédural.

Cette démarche peut se faire tout à fait automatiquement, par exemple à partir d'une bibliothèque de modèles de composants. Ceci est cependant en dehors du domaine de notre travail. Nous acceptons simplement les équations que peut nous fournir la physique traditionnelle, en tant que représentation fidèle de la structure du dispositif. C'est l'exploitation de ces équations qui distinguera notre approche de celle de la physique traditionnelle (ou quantitative). En effet, nous allons considérer par la suite ces équations comme des contraintes sur les n-uplets des relations Signe, Mgn-inf et Mgn-égal. Ces contraintes constituent une suite ordonnée. C'est précisément cette propriété qui particularise **notre travail**. **Nous appellerons cette suite, la liste des contraintes constitutives**. Contrairement aux autres approches de la physique qualitative dont nous avons pris connaissance, la satisfaction des contraintes se fera suivant un ordre procédural. Les équations constitutives subissent néanmoins une transformation mineure, lorsqu'elles sont exprimées en terme de contraintes. Nous introduisons un certain nombre de variables intermédiaires qui devront toutefois rester inconnues de l'utilisateur. Prenons par exemple l'équation suivante :

$$PCT = (QCT - QCTO) / CT(t)$$

Après introduction de la variable intermédiaire QCTmoinsQCTO, nous obtenons:

$$( \text{QCTmoinsQCTO différence}(\text{QCT QCTO}) )$$

$$( \text{PCT division}(\text{QCTmoinsQCTO CT}(t)) )$$

Si cette transformation n'avait pas été introduite ici, elle aurait dû être effectuée durant l'exécution. Pour des raisons de performance, nous avons abandonné cette solution, alors que nous tentions de la développer.

Nous avons établi, à titre d'illustration, la liste complète des contraintes constitutives de l'exemple du modèle électrique du ventricule gauche isolé.

$$( ( \text{QCTmoinsQCTO différence}(\text{QCT QCTO}) )$$

$$( \text{PCT division}(\text{QCTmoinsQCTO CT}(t)) )$$

$$( \text{QCmoinsQCO différence}(\text{QC QCO}) )$$

$$( \text{PC division}(\text{QCmoinsQCO C}) )$$

$$( \text{EmoinsPCT différence}(\text{E PCT}) )$$



```

( IF ( Mgn-Inf (PCT E) )
  THEN ( ID1 division (EmoinsPCT RD1PA) )
  ELSE ( ID1 division (EmoinsPCT RD1BLO) ) )

( PCTmoinsPC différence (PCT PC) )

( IF ( Mgn-Inf (PC PCT) )
  THEN ( ID2 division (PCTmoinsPC RD2PA) )
  ELSE ( ID2 division (PCTmoinsPC RD2BLO) ) )

( IR division (PC R) )

( ICT différence (ID1 ID2) )

( IC différence (ID2 IR) )

( (dérivée QC) égal (IC) )

( (dérivée QCT) égal (ICT) ) )

```

Ceci constitue l'ensemble minimal de contraintes constitutives. On peut éventuellement ajouter des contraintes sur les dérivées, obtenues en dérivant les équations constitutives si l'on désire savoir comment évolue chaque variable. Remarquons néanmoins que cela peut donner naissance à des contraintes très complexes, contrairement aux confluences de De Kleer et Brown. Ceci va à l'encontre des objectifs de la physique qualitative. Pour certains problèmes, cette complexité est sans doute impossible à contourner, par exemple lorsque l'utilisateur souhaite comparer l'évolution de deux variables: "Pourquoi cette variable augmente-t-elle plus vite que celle-ci?". Cependant, si l'on souhaite simplement savoir pourquoi une variable augmente ou décroît, une telle machinerie est inutile. Peut-être pourrait-on introduire les confluences de De Kleer lorsque l'on souhaite propager uniquement de l'information sur le signe. Une autre solution consiste à procéder comme Kuipers, c'est-à-dire propager l'information sur les variables en même temps que le signe de leur dérivée. De toute façon, il faudra éviter de produire un raisonnement compliqué s'il est possible d'en effectuer un beaucoup plus simple.



## 5.3 DESCRIPTION DU COMPORTEMENT

### 5.3.1 PRINCIPE

Au point précédent, nous avons présenté la manière dont nous décrivions la structure d'un dispositif physique. Nous expliquons maintenant comment déduire le comportement d'un système à partir de la description de sa structure et comment représenter ce comportement. Avant de voir ceci en détail, nous donnons ci-dessus un aperçu général de notre travail.

La description d'un système à un instant donné est définie par les signes et l'ordonnancement des paramètres de ce système à cet instant, c'est-à-dire par ce que nous avons appelé une *S-description*. Nous verrons qu'initialement, on dispose de certaines informations sur un système. Ces informations constituent une *S-description incomplète* du système. Pour déterminer la *S-description complète* à un moment donné, nous utilisons les *contraintes constitutives*. Nous verrons comment ces dernières vont nous permettre de propager cette information initiale afin de compléter notre *S-description*.

En physique qualitative, l'information moins riche dont on dispose sur un système ne nous permet pas toujours de déterminer de manière unique la description complète de ce système: c'est le problème d'*ambiguïté*. Nous verrons comment nous traitons cette ambiguïté et comment nous représentons les différentes descriptions possibles d'un système au moyen d'un *arbre*.

Déduire le comportement d'un système consiste à décrire les différentes descriptions du système à travers le temps. Pour cela, il nous faut découper le temps en *épisodes* (cf De Kleer), c'est-à-dire en intervalles de temps pendant lesquels la description du système est constante. A chaque épisode, nous aurons un arbre représentant les différentes descriptions possibles du système au cours de cet épisode. Le comportement du système sera alors représenté par un *diagramme des épisodes*, c'est-à-dire par un arbre dans lequel:

- chaque noeud sera un épisode,
- la racine représentera la description du système lors de l'épisode initial,
- chaque noeud décrira un des futurs possibles (descriptions possibles à l'épisode suivant) du noeud précédent

Dans ce qui suit, nous expliquons comment nous:

- utilisons les contraintes constitutives afin de propager les informations initiales connues sur un système et obtenir ainsi une *S-description complète*;
- représentons les descriptions possibles du système au cours d'un épisode;
- représentons le comportement d'un système.



### 5.3.2 Calcul qualitatif

Dans cette partie, nous spécifions ce que nous entendons par "évaluation d'une contrainte", c'est-à-dire que nous y définissons notre calcul qualitatif.

#### A) Evaluation d'une contrainte arithmétique

Lors de l'évaluation d'une contrainte arithmétique, nous supposons que les signes des opérandes de cette contrainte sont toujours connus (i.e. différent de "inconnu"). La justification de cette hypothèse ne sera donnée qu'au point 5.4 lors de l'évaluation du raisonnement causal que nous proposons.

Soit la contrainte arithmétique:

<res> <oper> <op-1> <op-2>

et une S-description renfermant les signes des opérandes (qui sont différents de "inconnu" par hypothèse), et éventuellement des relations de magnitude entre ces opérandes, l'évaluation de cette contrainte va nous permettre de déterminer le signe de <res> ainsi que, éventuellement, des relations de magnitude entre <res> et les opérandes:

Entrées:   ▪ <res> <oper> <op-1> <op-2>,           une contrainte arithmétique,  
          ▪ D, une S-description.  
              ||  
              || EVALUATION  
              ||  
              ▼

Sorties:   ▪ Signe (<res> <signe>) : signe du résultat de la contrainte,  
          [▪ Mgn-inf (<res> <op-1>) ] | relations d'ordre  
          [▪ Mgn-égal (<res> <op-1>) ] |           entre  
          [▪ Mgn-inf (<op-1> <res>) ] | => le résultat  
          [▪ Mgn-inf (<res> <op-2>) ] |           et  
          [▪ Mgn-égal (<res> <op-2>) ] | les opérandes  
          [▪ Mgn-inf (<op-2> <res>) ] | de la contrainte  
  (facultatif)

Les nouveaux n-uplets obtenus sont ajoutés à la S-description de départ afin de compléter notre connaissance sur l'état courant.

Ex: soit la S-description

{ Signe (ID positif) , Signe (IR négatif) }

et la contrainte

IC différence (ID IR),

nous pouvons déduire que

- IC a un signe positif
- IC a une valeur absolue supérieure à celles de IR et ID,



ce que nous représentons par les n-uplets:

- Signe (IC positif)
- Mgn-inf (IR IC)
- Mgn-inf (ID IC).

Les règles permettant d'effectuer une telle évaluation peuvent s'exprimer sous la forme de tables de décision:

	SOUCHE	ENTREES
SI	<condition-1>	[ 1 ]
	<condition-2>	
	.	
	.	
	<condition-1>	
ALORS	<action-1>	[ 2 ]
	<action-2>	
	.	
	.	
	<action-j>	

- où
- chaque condition concerne:
    - soit le signe d'une des opérandes,
    - soit une relation de magnitude entre les opérandes;
  - chaque action est relative:
    - soit au signe du résultat,
    - soit à une relation de magnitude entre le résultat et une des opérandes.

Chaque colonne de la partie droite de ce tableau forme une règle de décision où (1) représente les préconditions à remplir pour pouvoir appliquer les actions indiquées dans (2). Nous désignons un tel tableau : table d'évaluation d'une contrainte arithmétique.

Ex: table d'évaluation pour la contrainte arithmétique  
z différence (x y)

z diffé x - y	SOUCHE	ENTREES												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
S I	Signe (x positif)	*	*	*	*	*								
	Signe (x nul)						*	*	*					
	Signe (x négatif)									*	*	*	*	*
	Signe (y positif)			*	*	*		*						*
	Signe (y nul)		*					*					*	
	Signe (y négatif)	*					*			*	*	*		
	Mgn-inf (x y)			*						*				
	Mgn-égal (x y)				*	*						*		
	Mgn-inf (y x)				*						*			
A L O R S	Signe (z positif)	*	*		*		*			*				
	Signe (z nul)					*		*				*		
	Signe (z négatif)			*					*		*		*	*
	Mgn-inf (z x)				*						*			
	Mgn-égal (z x)		*										*	
	Mgn-inf (x z)	*												*
	Mgn-inf (z y)			*						*				
	Mgn-égal (z y)					*		*						
	Mgn-inf (y z)	*	*											*

Dans l'exemple ci-dessus, les préconditions de l'entrée 1 sont remplies:  $x \Rightarrow$  IR négatif et  $y \Rightarrow$  ID positif. En remplaçant les variables x, y, z de la table par les paramètres correspondant de la contrainte, nous obtenons l'instantiation de table suivante:



IC diffé ID-IR	SOUCHE	ENTREES	
		1	
S I	<b>Signe (ID positif)</b>	*	⇒ ID positif
	Signe (ID nul)		
	Signe (ID négatif)		
	Signe (IR positif)		
	Signe (IR nul)		
	<b>Signe (IR négatif)</b>	*	⇒ IR négatif
	Mgn-inf (ID IR)		
	Mgn-égal (ID IR)		
	Mgn-inf (IR ID)		
A L O R S	<u>Signe (IC positif)</u>	*	⇒ IC positif
	Signe (IC nul)		
	Signe (IC négatif)		
	Mgn-inf (IC ID)		
	Mgn-égal (IC ID)		
	<u>Mgn-inf (ID IC)</u>	*	⇒  ID  <  IC
	Mgn-inf (IC IR)		
	Mgn-égal (IC IR)		
	<u>Mgn-inf (IR IC)</u>	*	⇒  IR  <  IC

Les préconditions de l'entrée 1 (en gras) sont satisfaites. Dès lors, les actions correspondant à cette entrée peuvent être exécutées: les relations indiquées dans cette action (en souligné) peuvent être ajoutées à notre S-description initiale. La nouvelle S-description se compose des n-uplets suivants:

- Signe (IR négatif)
- Signe (ID positif)
- Signe (IC positif)     $\cap$
- Mgn-inf (ID IC)        $\parallel$  : n-uplets ajoutés
- Mgn-inf (IR IC)        $\cup$

Une table d'évaluation sera définie par opérateur (voir chap 6).

Dans certains cas cependant, la description du réel ne fournit pas l'information nécessaire pour associer le signe au résultat. Ceci correspond aux cas non prévus dans les entrées de la table d'évaluation.

Ex: Soit la contrainte

z différence (x y)

et une S-description limitée aux n-uplets

Signe (x positif)

Signe (y positif),

n'ayant aucune information sur les magnitudes relatives de x et y, nous ne pouvons déduire le signe de z: aucune entrée de la table n'a toutes ses préconditions satisfaites.

Dans ce cas, l'évaluation de la contrainte renverra le n-uplet:

Signe (z inconnu)



## B) Evaluation d'une condition

Etant donné une S-description, l'information représentée par cette S-description consiste non seulement en les n-uplets des relations Signe, Mgn-inf et Mgn-égal, mais aussi en les n-uplets qui peuvent être **déduits** des n-uplets de la S-description. Cette déduction se base sur les propriétés de **transitivité** des relations Mgn-inférieur et Mgn-égal:

$$\text{Mgn-inf (A B) et Mgn-inf (B C) } \implies \text{Mgn-inf (A C)}$$

i. e. Mgn-inf(A C) est déduit de Mgn-inf(A B) et Mgn-inf(B C)

$$\text{Mgn-égal (A B) et Mgn-égal (B C) } \implies \text{Mgn-égal (A C)}$$

i. e. Mgn-égal(A C) est déduit de Mgn-égal(A B) et Mgn-égal(B C)

$$\text{Mgn-inf (A B) et Mgn-égal (B C) } \implies \text{Mgn-inf (A C)}$$

i. e. Mgn-inf(A C) est déduit de Mgn-inf(A B) et Mgn-égal(B C)

et la propriété de **symétrie** de la relation Mgn-égal:

$$\text{Mgn-égal (A B) } \implies \text{Mgn-égal (B A)}$$

i. e. Mgn-inf(B A) est déduit de Mgn-égal(A B)

Dès lors, nous définissons l'évaluation d'une condition-simple dans une S-description D:

Soit  $S[\text{sgn}]$ , l'ensemble des *signes contradictoires* avec "sgn" défini comme suit:

$S[\text{sgn}] = \{\text{positif, nul, négatif, inconnu}\} \setminus \{\text{sgn, inconnu}\},$   
avec  $\text{sgn} \in \{\text{positif, nul, négatif}\},$

Ex:  $S[\text{positif}] = \{\text{nul, négatif}\}$

et  $R[\text{rel}(\langle x \rangle \langle y \rangle)]$ , l'ensemble des *relations contradictoires* avec le n-uplet,  $\text{rel}(\langle x \rangle \langle y \rangle)$ , défini comme suit:

$$R[\text{Mgn-égal}(x, y)] = \{\text{Mgn-inf}(x, y), \text{Mgn-inf}(y, x)\}$$

$$R[\text{Mgn-inf}(x, y)] = \{\text{Mgn-égal}(x, y), \text{Mgn-inf}(y, x)\}$$

▪ **l'évaluation de la condition-simple**

Signe (<par> <sgn>)

renvoie TRUE ssi le n-uplet Signe(<par> <sgn>) appartient à D; elle renvoie FALSE ssi il existe sgn-contr  $\in S[\text{sgn}]$  tel que le n-uplet Signe(<par><sgn-contr>) appartient à D; dans les autres cas, elle renvoie INCONNU;

▪ **l'évaluation de la condition-simple**

<relation> (<par-1> <par-2>)

renvoie TRUE ssi le n-uplet relation (<par-1><par-2>) appartient à D ou peut être déduit des n-uplets de D; elle renvoie FALSE ssi il existe rel-contr(x,y)  $\in R$  [ relation (<par-1> <par-2>) tel que le n-uplet rel-contr [<par-1> <par-2>] appartient à D ou peut-être déduit des n-uplets de D; dans les autres cas, elle renvoie INCONNU;

Les trois valeurs possibles pour l'évaluation d'une condition simple sont donc:

- <TRUE>
- <FALSE>
- <INCONNU>.

Ex: Soit la S-description D:

{ Signe(A,positif) , Signe(B,positif) , Signe(C,négatif) ,  
Signe(D,négatif) ,  
Mgn-inf(A,B) , Mgn-inf(B,C) , Mgn-inf(D,C) }

nous donnons ci-dessous quelques conditions simple et le résultat et la justification de leur évaluation:

Condition-simple

Résultat-évaluation

(A positif)	$\Rightarrow$	TRUE car Signe(A,positif) $\in D$
(B nul)	$\Rightarrow$	FALSE car il existe positif $\in S[\text{nul}]$ tel que le n-uplet (B positif) $\in D$ .
Mgn-inf(A,C)	$\Rightarrow$	TRUE car le n-uplet Mgn-inf(A,C) peut-être déduit des n-uplets Mgn-inf(A,B) et Mgn-inf(B,C).
Mgn-égal(A,C)	$\Rightarrow$	FALSE car il existe Mgn-inf(A,C) $\in R$ [ Mgn-égal(A,C) ] tel que Mgn-inf(A,C) peut-être déduit de D.
Mgn-inf(B,C)	$\Rightarrow$	INCONNU.



Nous pouvons maintenant définir l'évaluation d'une conjonction de conditions simples dans une S-description D:

#### L'évaluation de la condition

```

      |ET|
<condition-simple> [ | | <condition> ]
      |OU|

```

- renvoie la valeur TRUE si l'évaluation de la <condition-simple> donne TRUE,

```

|ET|
| | l'évaluation de <condition> renvoie la valeur TRUE;
|OU|

```

- renvoie la valeur FALSE si l'évaluation de la <condition-simple> donne FALSE

```

|OU|
| | l'évaluation de <condition> renvoie la valeur FALSE.
|ET|

```

- renvoie INCONNU sinon.

Ceci peut s'exprimer à l'aide de tableaux ayant la structure suivante:

ET/OU	Résultat de l'évaluation de <cond-simple>						
Résultat de l'évaluation de <condition>	<table> <tr> <th>Résultat de l'évaluation de &lt;cond-simple&gt;</th><th>Résultat de l'évaluation de &lt;condition&gt;</th></tr> <tr> <td> ET </td><td></td></tr> <tr> <td> OU </td><td></td></tr> </table>	Résultat de l'évaluation de <cond-simple>	Résultat de l'évaluation de <condition>	ET		OU	
Résultat de l'évaluation de <cond-simple>	Résultat de l'évaluation de <condition>						
ET							
OU							

Ces tables de vérité ("augmentée" par la valeur INCONNU) pour les connecteurs logiques ET et OU sont

ET	TRUE	FALSE	INCONNU
TRUE	TRUE	FALSE	INCONNU
FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
INCONNU	INCONNU	FALSE	INCONNU

OU	TRUE	FALSE	INCONNU
TRUE	TRUE	TRUE	TRUE
FALSE	TRUE	FALSE	INCONNU
INCONNU	TRUE	INCONNU	INCONNU

Voici quelques exemples d'évaluation de conditions:

Soit la S-description D:

```
{ Signe(A, positif) , Signe(B, positif) , Signe(C, négatif) ,
  Signe(D, négatif) ,
  Mgn-inf(A, B) , Mgn-inf(B, C) , Mgn-inf(D, C) }
```

<u>Conditions</u>	<u>Evaluation-conditions</u>
▪ Mgn-inf(A, B) ET Mgn-inf(A, C) $\Rightarrow$	TRUE
▪ Mgn-inf(A, B) ET Mgn-inf(A, D) $\Rightarrow$	INCONNU
▪ Mgn-égal(A, B) OU Mgn-inf(A, D) $\Rightarrow$	INCONNU
▪ Mgn-égal(A, B) OU Mgn-égal(C, D) $\Rightarrow$	FALSE
▪ Mgn-inf(A, B) ET ( Mgn-égal(A, D) OU Mgn-inf(A, D) ) $\Rightarrow$	INCONNU

L'évaluation d'une conjonction de conditions:

```

      |ET|
<condition> | | <condition>
      |OU|

```

est définie de la même manière que celle d'une condition, en remplaçant <cond-simple> par <condition>.

Ex:

```

( Mgn-inf(A, B) ET Mgn-inf(A, C) )
      OU  $\Rightarrow$  TRUE
( Mgn-égal(A, B) ET Mgn-inf(A, C) )

```



### C) Ambiguïté

Lors de l'évaluation d'une contrainte arithmétique ou d'une condition, nous avons vu que nous pouvions obtenir comme résultat la valeur INCONNU (ou inconnu). Dans ce cas, on dit qu'il y a ambiguïté: l'information moins riche de la physique qualitative ne nous permet pas d'évaluer une condition ou de déterminer le signe du résultat d'une contrainte.

Dès qu'il y a ambiguïté, nous ne pouvons plus étendre la S-description de l'état courant sans faire d'hypothèse(s) sur le résultat de l'évaluation d'une condition ou d'une contrainte. A la S-description de l'instant  $t_1$ , peuvent correspondre plusieurs S-descriptions à l'instant suivant  $t_2$ . Ces S-descriptions représentent les différents états futurs possibles que peut prendre le système. Dans l'exemple précédent [4.88], si nous supposons que:

$$|y| < |x|,$$

alors nous pouvons en déduire que

$$z > 0 \text{ et } |z| < |x|.$$

Le même type de raisonnement peut-être fait en partant de l'hypothèse:  $|x| = |y|$ , ou de l'hypothèse:  $|x| < |y|$ ; ce qui nous donne:

$$z = x - y, |x| > 0, |y| > 0 \text{ et } |x| = |y| \Rightarrow z = 0$$

$$z = x - y, |x| > 0, |y| > 0 \text{ et } |x| < |y| \Rightarrow \begin{matrix} z < 0 \\ |z| < |y| \end{matrix}$$

Face à une ambiguïté, deux comportements sont possibles:

- soit on garde une seule hypothèse et on élimine toutes les autres; dans ce cas, on ne retient jamais qu'un seul des états futurs possibles et on rejette les autres (cf Forbus et Kuipers).
- soit on garde toutes les hypothèses et on calcule l'ensemble des états futurs possibles (cf De Kleer).

C'est cette deuxième solution que nous avons retenu. Pour la réaliser, il nous faut un moyen pour représenter les hypothèses et les différentes solutions possibles associées à ces hypothèses. Dans ce but, nous définissons d'abord la liste des hypothèses pour l'évaluation d'une contrainte arithmétique et ensuite les listes d'hypothèses pour l'évaluation d'une condition.

D) Liste d'hypothèses pour l'évaluation d'une contrainte arithmétique

Etant donné une S-description D et une contrainte arithmétique CA,

- si l'évaluation de la contrainte CA associe au résultat de la contrainte la valeur "inconnu", alors H est la liste d'hypothèse(s) pour l'évaluation de la contrainte CA si et seulement si:
  - 1) pour toute hypothèse h appartenant à la liste d'hypothèses H, l'évaluation de la contrainte CA sachant D et h associe au résultat une valeur autre que "inconnu";
  - 2) pour tout h1 et h2 appartenant à H, h2 ne peut être déduite de D et h1 (indépendance des hypothèses);
  - 3) il n'existe pas d'hypothèse h, n'appartenant pas à H et indépendante des hypothèses de H, telle que l'évaluation de CA, sachant D et h, associe au résultat une valeur différente de "inconnu".
- si l'évaluation de la contrainte CA sachant D associe au résultat la valeur soit "positif", soit "négatif", soit "nul", alors la liste d'hypothèses pour l'évaluation de la contrainte CA est une liste vide.

Ex: La liste d'hypothèses pour l'évaluation de la contrainte z différence (x y) de l'exemple précédent est la suivante:

( Mgn-inf (y,x) , Mgn-égal (x,y) , Mgn-inf (x,y) ).

A chacune de ces hypothèses, correspond respectivement la valeur suivante du signe de z: positif, nul, négatif. L'hypothèse Mgn-égal (y x) n'appartient pas à cette liste, bien qu'attribuant à z le signe "nul" (et donc différent de "inconnu"), car elle peut-être déduite de l'hypothèse Mgn-égal (x y) par la propriété de réflexivité de la relation Mgn-égal (indépendance des hypothèses).

Lorsque l'évaluation d'une contrainte dans une S-description D donne le résultat "inconnu" (ambiguïté), nous construisons la liste d'hypothèses pour l'évaluation de cette contrainte. Après, nous prenons une à une ces hypothèses et nous l'ajoutons à D pour former une nouvelle S-description D' plus complète. Ensuite, nous recommençons l'évaluation de cette contrainte mais dans D'. Par définition de la liste d'hypothèses, cette nouvelle évaluation ne peut plus conduire à une ambiguïté: elle donne le signe (différent de "inconnu") de <res>, ainsi qu'éventuellement, des relations d'ordre entre les magnitudes de <res> et des 2 opérandes.

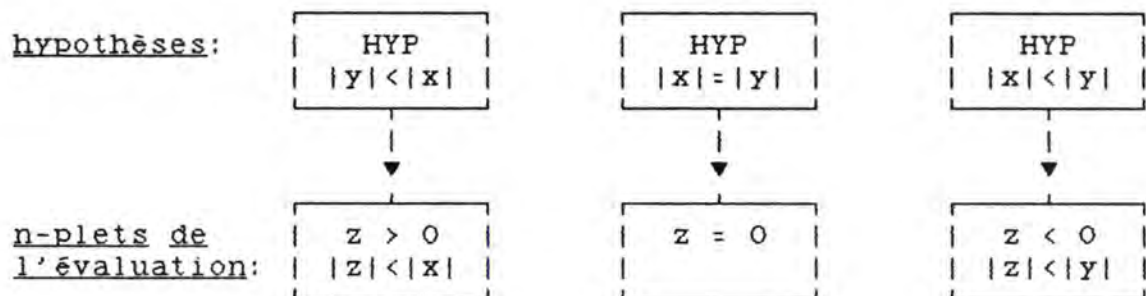


Pour représenter chaque hypothèse et le résultat de l'évaluation associée à cette hypothèse, nous utilisons une structure de forêt, c'est-à-dire un ensemble d'arbres (plus précisément, nous aurons ici un ensemble de chaînes) où:

- à chaque hypothèse, on attribue la racine d'un arbre;
- à chacune de ces racines, on associe un noeud comprenant les n-uplets de l'évaluation relative à cette hypothèse.

De plus, afin de reconnaître les noeuds représentant une hypothèse, on ajoutera à l'intérieur de ces noeuds le string: "HYP".

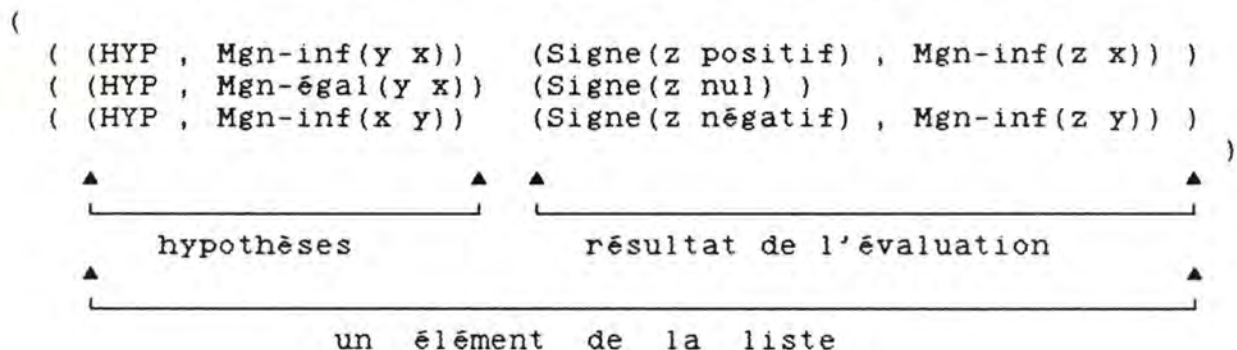
Ex: En reprenant toujours le même exemple, nous obtenons la forêt suivante:



Cette structure de forêt sera implémentée sous la forme d'une liste dont chaque élément est lui-même une liste de 2 listes:

- une liste renfermant une des hypothèses de la liste d'hypothèses et le string "HYP";
- une liste comprenant les n-uplets de l'évaluation associée à cette hypothèse.

Ex: La liste correspondant à notre exemple est la suivante:



### E) Liste d'hypothèses pour l'évaluation d'une condition

Lors de l'évaluation d'une condition, nous pouvons également obtenir une ambiguïté. De la même manière que pour les contraintes arithmétiques, nous devons définir des listes d'hypothèses pour l'évaluation d'une condition:

Etant donné une S-description D et une condition C,

- si l'évaluation de C renvoie la valeur "INCONNU",  
alors H-TRUE (H-FALSE) est la liste de listes d'hypothèse(s)  
pour l'évaluation de la condition C si et seulement si:
  - 1) pour toute sous-liste d'hypothèse(s) h appartenant à la liste d'hypothèses H-TRUE (H-FALSE),  
l'évaluation de C dans la S-description, D U {h},  
associe au résultat la valeur "TRUE" (FALSE);
  - 2) pour toutes sous-listes h1 et h2 appartenant à H-TRUE (H-FALSE), h2 ne peut être déduite de D et h1  
(indépendance des sous-listes d'hypothèses);
  - 3) il n'existe pas de sous-liste d'hypothèses h,  
n'appartenant pas à H-TRUE (H-FALSE) et indépendante  
des hypothèses de H-TRUE (H-FALSE), telle que  
l'évaluation de C dans la S-description, D U {h},  
associe au résultat la valeur "TRUE" ("FALSE").
- si l'évaluation de C sachant D renvoie la valeur "TRUE",  
alors H-TRUE est la liste contenant la liste vide: (()),  
H-FALSE est la liste vide: ();
- si l'évaluation de C sachant D renvoie la valeur "FALSE",  
alors H-TRUE est la liste vide: (),  
H-FALSE est la liste contenant la liste vide: (());

Chaque sous-liste de H-TRUE (H-FALSE) est représentée par un noeud renfermant toutes les hypothèses de cette sous-liste. L'évaluation d'une condition donne donc un ensemble de noeud correspondant aux sous-listes d'hypothèses H-TRUE et H-FALSE. Pour distinguer les noeuds associés à H-TRUE de ceux de H-FALSE, nous ajouterons à la tête de chaque sous-liste de H-TRUE (H-FALSE) le string "TRUE" ("FALSE"). Donc, chaque liste suivant l'élément TRUE (FALSE) dans H-TRUE (H-FALSE) est une liste d'hypothèses permettant d'évaluer la condition à TRUE (FALSE).



Ex: Soit la S-description D:

{ Mgn-inf(A B) , Signe(B positif) , Signe(C positif) }

et la condition

( ( ( Signe (A positif) ) ET ( Mgn-inf (A C) ) )  
OU  
( Signe (A nul) ) ) ,

Trois listes d'hypothèses permettent d'évaluer cette condition à TRUE:

H1 = ( TRUE (Signe(A positif)) (Mgn-inf(A C)) )  
H2 = ( TRUE (Signe(A positif)) (Mgn-inf(B C)) )  
H3 = ( TRUE (Signe(A nul)) ) .

Ces listes ne sont cependant pas indépendantes: la liste H1 peut être déduite de D et de H2:

D  $\Rightarrow$  Mgn-inf (A B)  
H2  $\Rightarrow$  Signe (A positif) et Mgn-inf (B C)  
 $\parallel$   
 $\parallel$   
 $\downarrow$   
Signe (A positif) et Mgn-inf (A C)  $\Rightarrow$  H1

Dans ce cas, nous éliminerons la liste d'hypothèse la plus restrictive, c'est-à-dire celle qui associée à la S-description D permet de déduire d'autres n-uplets que ceux de D et de cette liste. Dans notre exemple, il s'agit de H2 puisque de H2 et D, on peut déduire, en plus le n-uplet:

Mgn-inf(A C)

Par contre, il n'est pas possible de déduire d'autres n-uplets de H1 et D. H-TRUE sera donc composé des listes H1 et H3:

H-TRUE = ( (TRUE (Signe(A positif)) (Mgn-inf(A C)))  
(TRUE (Signe(A nul))) ) .

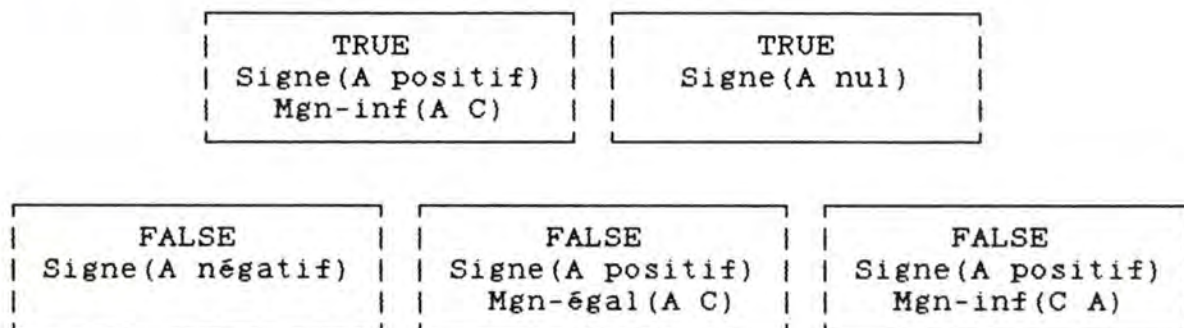
Quatre listes d'hypothèses permettent d'évaluer cette condition à FALSE:

H1 = ( FALSE (Signe(A négatif)) )  
H2 = ( FALSE (Signe(A positif)) (Mgn-égal(A C)) )  
H3 = ( FALSE (Signe(A positif)) (Mgn-inf(C A)) )

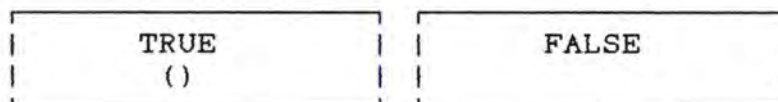
Ici, nous avons des hypothèses indépendantes, H-FALSE est donc composée de H1, H2 et H3:

H-FALSE = ( (FALSE (Signe(A négatif)))  
(FALSE (Signe(A positif)) (Mgn-égal(A C)))  
(FALSE (Signe(A positif)) (Mgn-inf(C A))) )

Après évaluation de cette condition, nous obtenons l'ensemble des noeuds suivants:



Dans le cas où la condition est toujours vraie, nous obtenons les deux noeuds suivants:



et dans le cas où la condition est toujours fausse:



#### F) Evaluation d'une liste de contraintes

Nous représentons le résultat de l'évaluation d'une liste de contraintes dans une S-description D par une forêt définie comme suit:

Soit ( C ; liste-contr ), une liste de contraintes,

- Si C est une contrainte arithmétique:

Soit F (forêt), l'ensemble des chaînes obtenues lors de l'évaluation de C dans D, pour tout A (arbre-chaîne)  $\in$  F, on définit l'arbre d'évaluation de la liste ( C ; liste-contr ) associé à A dans D, comme l'arbre constitué de l'arbre A à la feuille duquel sont attachées les racines des arbres d'évaluation de la liste ,liste-contr, dans la S-description D complétée par les éléments de A;

l'ensemble de ces arbres d'évaluation (un par élément de F) forme la forêt d'évaluation de la liste de contraintes ( C ; liste-contr ).



- Si C est la contrainte conditionnelle:

IF <cond> THEN <l-contr-1>  
ELSE <l-contr-2>

Soit  $h_1$  et  $h_2$ , étant respectivement les listes d'hypothèses H-TRUE ET H-FALSE de la condition <cond>:

pour tout  $n$  (noeud)  $\in h_1$ , on définit l'arbre d'évaluation de la liste (C : liste-contr) associé à  $n$  dans D, comme l'arbre constitué de la racine  $n$  à laquelle sont attachées les racines des arbres d'évaluation de la liste (l-contr-1 liste-contr) dans la S-description D complétée par  $n$ ;

pour tout  $n$  (noeud)  $\in h_2$ , on définit l'arbre d'évaluation de la liste (C : liste-contr) associé à  $n$  dans D, comme l'arbre constitué de la racine  $n$  à laquelle sont attachées les racines des arbres d'évaluation de la liste (l-contr-1 liste-contr) dans la S-description D complétée par  $n$ ;

l'ensemble de ces arbres d'évaluation (un par élément de  $h_1$  et  $h_2$ ) forme la forêt d'évaluation de la liste de contraintes (C : liste-contr).

Ex:

- Soit la liste de contrainte

( VC division (QC C) , X différence (E VC) ) )

et la S-description D

{ Signe (QC positif) , Signe (C positif) ,  
Signe (E positif) },

- l'évaluation de la première contrainte dans D donne le noeud suivant (pas d'ambiguïté):

VC +

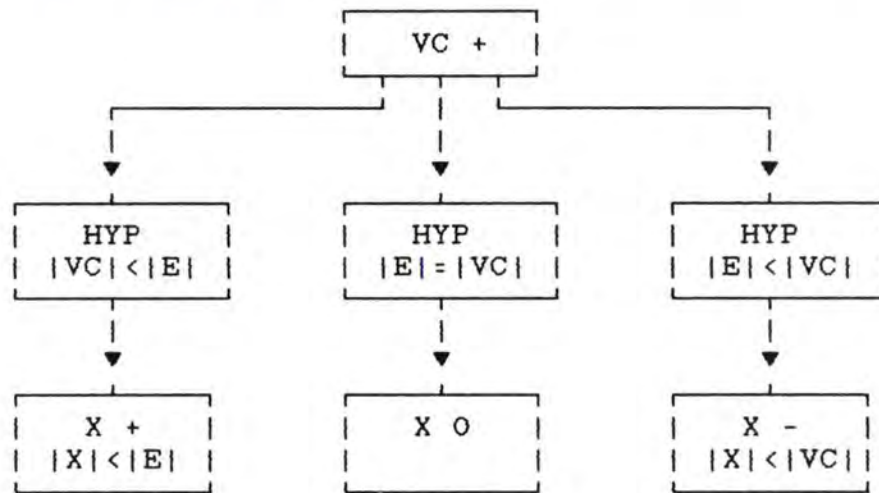
- celle de la deuxième contrainte dans D U {Signe (VC positif)} fournit les 3 chaînes ci- dessous:

HYP  
|VC| < |E|  
↓  
X +  
|X| < |E|

HYP  
|E| = |VC|  
↓  
X 0

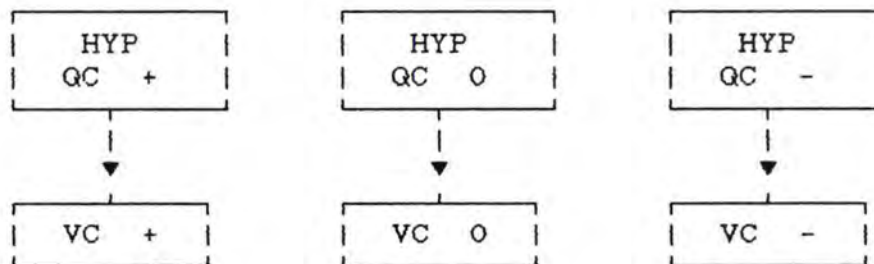
HYP  
|E| < |VC|  
↓  
X -  
|X| < |VC|

- la forêt d'évaluation de la liste C dans D est composée d'un arbre unique:



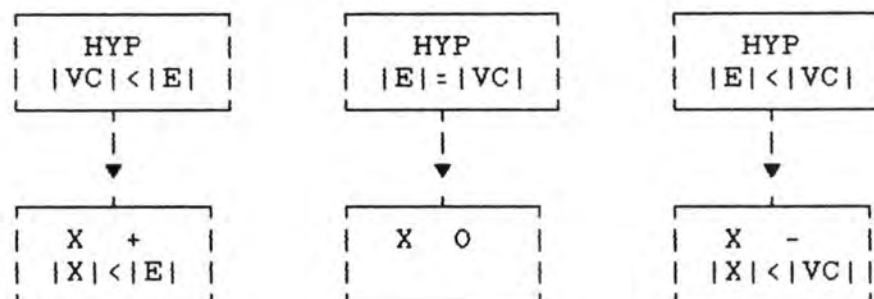
- 2) Reprenons le même exemple mais avec une S-description plus faible: on suppose ici ne pas connaître le signe de QC;

- l'évaluation de la première contrainte donne:



- celle de la deuxième

- dans D U { Signe (QC positif) , Signe (VC positif) }  
donne:





■ dans

D U { Signe (QC nul) , Signe (VC nul) }  
donne le noeud unique:

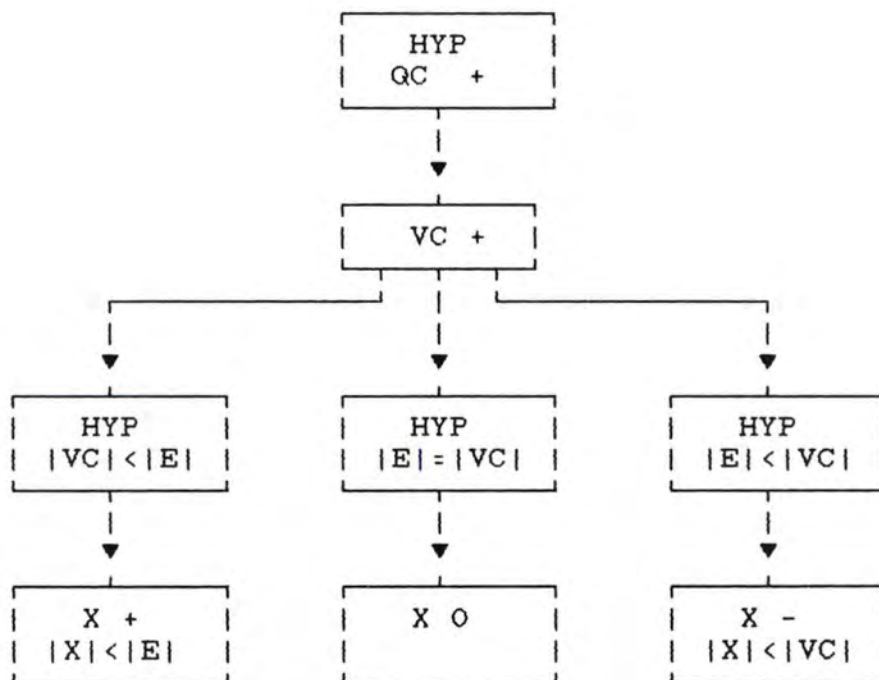
$$\begin{array}{|c|} \hline X + \\ \hline |X| = |E| \\ \hline \end{array}$$

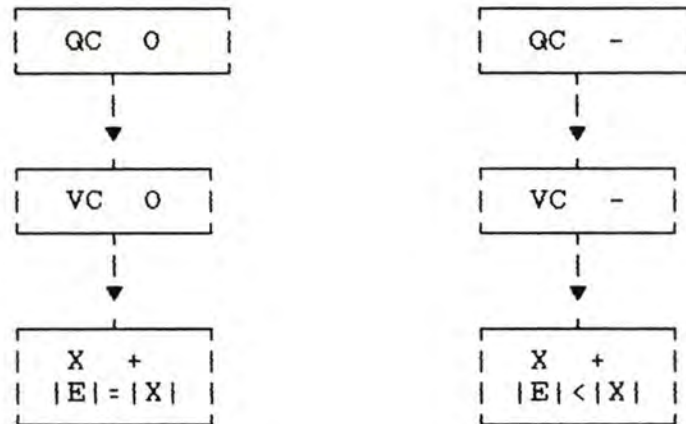
■ dans

D U { Signe (QC négatif) , Signe (VC négatif) }  
donne:

$$\begin{array}{|c|} \hline X + \\ \hline |E| < |X| \\ \hline \end{array}$$

■ la forêt d'évaluation de la liste C est composée des trois arbres:





3) Soit la contrainte conditionnelle

```

IF (E > VC) THEN ( X différence (E VC)
                   ID division (X RPA) )
ELSE ( X différence (E VC)
       ID division (X RBLO) )

```

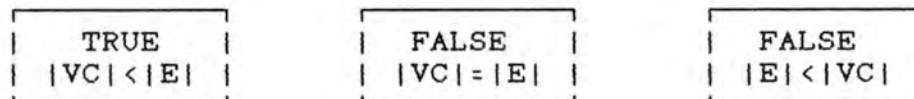
et la S-description D

```

{ Signe (E positif) , Signe (VC positif) ,
  Signe (RPA positif) } , Signe (RBLO positif) }

```

- l'évaluation de la condition dans D donne les noeuds suivants (ambiguïté):



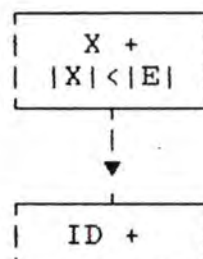
- celle de la liste de contraintes

```
( X différence (E VC) , ID division (X RPA) )
```

dans

```
D U { Mgn-inf (VC E) }
```

fournit la chaîne:





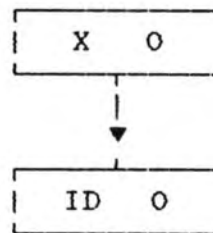
- celle de la liste de contraintes

( X différence (E VC) , ID division (X RBLO) )

dans

D U { Mgn-égal (VC E) }

fournit la chaîne:



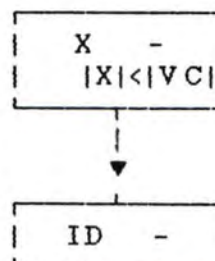
- celle de la liste de contraintes

( X différence (E VC) , ID division (X RBLO) )

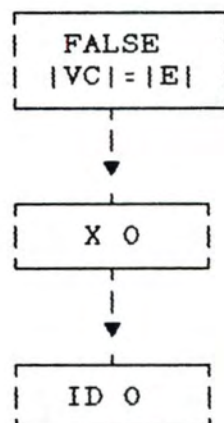
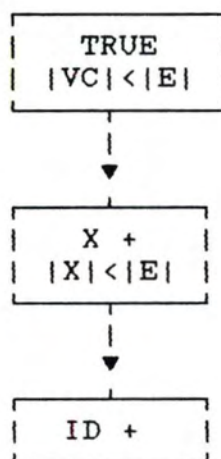
dans

D U { Mgn-inf (E VC) }

fournit la chaîne:



- les trois arbres d'évaluation de la contrainte conditionnelle sont:





FALSE  
|E| < |VC|



X -  
|X| < |VC|



ID -

### 5.3.3 CONSTRUCTION DES EPISODES POSSIBLES

Pour décrire les états possibles d'un système à un moment donné, nous disposons de deux choses:

- la liste des contraintes constitutives de ce système;
- un certain nombre de conditions imposées par l'utilisateur sur les valeurs des paramètres de ce système: les *contraintes de valeurs imposées*.

#### A) Contraintes de valeurs imposées

Lorsque l'on étudie l'état d'un système, on peut avoir à priori un certain nombre d'informations sur cet état ou bien on peut supposer que cet état satisfait à un certain nombre de conditions. Ces informations et conditions concernent le signe des paramètres ou les relations de magnitude entre les paramètres. Elles peuvent donc être représentées par des n-uplets. Nous appellerons cet ensemble de n-uplets l'ensemble des *contraintes de valeurs imposées*. Cet ensemble décrit partiellement le système, c'est donc une S-description incomplète.

Les contraintes constitutives vont servir à propager l'information contenue dans cette S-description et à déterminer ainsi les différents états possibles du système satisfaisant aux contraintes de valeurs imposées.

#### B) Arbre et noeuds morts

Lors de l'évaluation d'une contrainte, nous avons supposé que les signes des opérandes étaient toujours connus (point 5.3.2). Maintenant, le signe du résultat de la contrainte peut être fixé avant cette évaluation s'il est spécifié dans les contraintes de valeurs imposées. Si tel est le cas, il faut s'assurer que l'évaluation de la contrainte attribue au résultat un signe compatible avec celui indiqué dans les valeurs imposées. Sont *incompatibles* (ou contradictoire) entre eux les signes "positif", "négatif" et "nul". Chaque signe est *compatible* avec lui-même et avec le signe "inconnu". Lorsqu'il y a contradiction, cela signifie qu'il y a incompatibilité entre les contraintes de valeurs imposées et une des contraintes constitutives. Dans ce cas, le noeud représentant l'évaluation de cette contrainte sera dit "*mort*". Afin de pouvoir repérer les noeuds morts, on ajoutera à ce noeud, en plus des n-uplets résultant de l'évaluation, le string "*MORT*".

Ex: Soit la liste de contraintes

( VC division(Q C) , X différence(E VC) )

avec les contraintes de valeurs imposées:

{ Signe(C positif) , Signe(Q positif) , Signe(E négatif) ,  
Signe(X positif) }



l'évaluation de la première contrainte attribuée à VC le signe "positif"; l'évaluation de la deuxième attribuée à X le signe "négatif" qui est contradictoire avec le signe "positif" donné dans les contraintes de valeurs; elle donnera donc le noeud suivant:

"MORT"
X -
E  <  X
VC  <  X

### C) Arbre d'évaluation des contraintes constitutives

Les différentes descriptions possibles dans un épisode seront représentées par un arbre d'évaluation des contraintes constitutives:

Soit I, la S-description composée des contraintes imposées,

L, la liste des contraintes constitutives du système,

F = (A<sub>1</sub>, ..., A<sub>n</sub>), la forêt d'évaluation de la liste de contraintes L dans la S-description I,

nous appelons arbre d'évaluation des contraintes constitutives dans I, l'arbre ayant pour racine le noeud représentant les contraintes imposées (I), et pour sous-arbres les arbres A<sub>i</sub> ∈ F.

Ex: Si nous limitons la liste de nos contraintes constitutives à la liste L suivante:

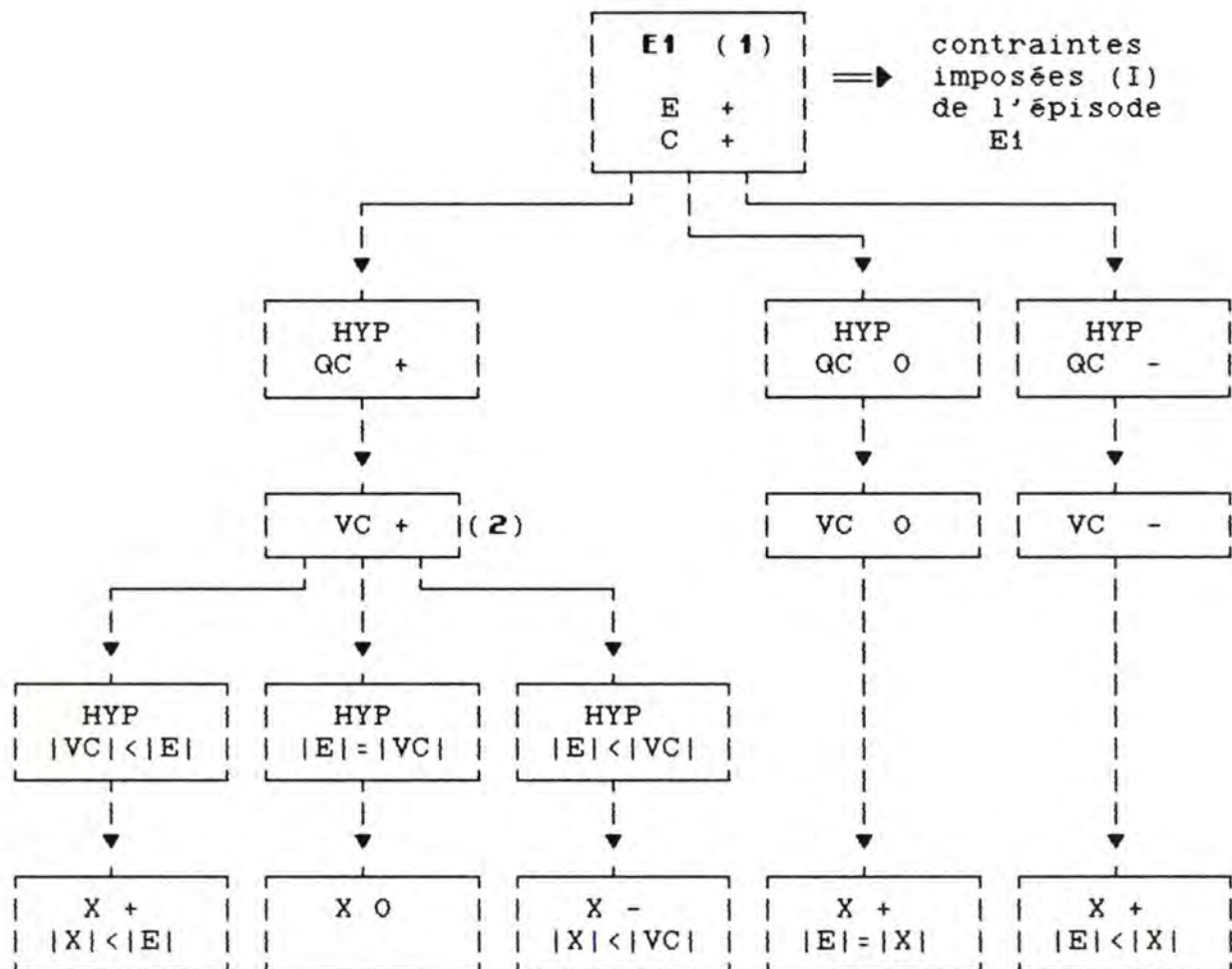
( VC division (QC C) , X différence (E VC) )

▪ nous ne désirons que les descriptions où E et C sont positifs (contraintes de valeurs imposées);

la forêt d'évaluation de la liste L dans la S-description

{ Signe (E positif) , Signe (C positif) }

a déjà été construite à l'exemple 2 du point 5.3.2 F; à partir de celle-ci, nous pouvons construire l'arbre d'évaluation des contraintes constitutives:



Un tel arbre décrit les états possibles du système à un moment donné. Afin d'indiquer l'épisode auquel se rattache ces états, nous ajoutons un *identifiant* de cet épisode dans le noeud représentant la racine; ex: "E1" (épisode 1), voir (1) sur le schéma ci-dessus.

#### D) S-description

L'arbre défini ci-dessus représentent toutes les descriptions possibles du système. Pour obtenir une de ces descriptions, il suffit d'effectuer un *parcours en profondeur* dans cet arbre et de rassembler les n-uplets présents dans les noeuds de ce parcours. Un tel ensemble de n-uplets constitue une *S-description complète* du système.

Plus généralement, lorsque l'on se trouve en un noeud *n* de l'arbre, l'information connue sur le système en ce noeud est constituée de la *S-description* définie comme l'ensemble des n-uplets présents dans ce noeud et dans les ancêtres de ce noeud. Si ce noeud est une feuille non morte de l'arbre, alors elle est complète, sinon elle est incomplète.



Ex: Dans l'exemple précédent, l'arbre représente cinq descriptions possibles pour le système:

Description 1:

```
{ Signe(C positif) , Signe(E positif) , Signe(QC positif) ,  
  Signe(VC positif) , Mgn-inf(VC E) , Signe(X positif) ,  
  Mgn-inf(X E) }
```

Description 2:

```
{ Signe(C positif) , Signe(E positif) , Signe(QC positif) ,  
  Signe(VC positif) , Mgn-égal(E VC) , Signe(X nul) }
```

Description 3:

```
{ Signe(C positif) , Signe(E positif) , Signe(QC positif) ,  
  Signe(VC positif) , Mgn-inf(E VC) , Signe(X négatif) ,  
  Mgn-inf(X VC) }
```

Description 4:

```
{ Signe(C positif) , Signe(E positif) , Signe(QC nul) ,  
  Signe(VC nul) , Signe(X positif) , Mgn-égal(E X) }
```

Description 5:

```
{ Signe(C positif) , Signe(E positif) , Signe(QC négatif) ,  
  Signe(VC négatif) , Signe(X positif) , Mgn-inf(E X) }
```

La S-description du noeud noté (2) dans le schéma précédent est la suivante:

```
{ Signe(C positif) , Signe(E positif) , Signe(QC positif) ,  
  Signe(VC positif) }
```

Elle est incomplète puisque (2) n'est pas un noeud terminal de l'arbre.

La S-description en un noeud mort sera dite **incohérente** puisqu'elle renfermera des n-uplets contradictoires.

#### 5.3.4 DIAGRAMME DES EPISODES

Jusqu'à présent, nous n'avons parlé que des descriptions possibles d'un système au cours d'un épisode donné. Nous allons maintenant voir comment nous étendons les concepts vus jusqu'ici afin de pouvoir représenter les descriptions des situations dans lesquelles se retrouve successivement le système au cours du temps, c'est-à-dire au cours d'épisodes successifs.

##### A) Paramètres d'état

En physique classique, pour connaître les valeurs des paramètres d'un système à un instant  $t_2$  étant donné leurs valeurs à un instant antérieur  $t_1$ , on utilise le **principe du simulateur**:

- 1.) Calculer la dérivée des variables d'état à l'instant  $t_1$ ;
- 2.) Calculer la valeur des variables d'état à l'instant  $t_2$  (avec  $t_1 < t_2$ ):  
  
soit  $E$ , une variable d'état, sa valeur à l'instant  $t_2$  est déterminée par l'équation:  
  
$$E(t_2) = E(t_1) + ( \partial E(t_1) / \partial t ) * (t_2 - t_1)$$
- 3.) Calculer la valeur des autres variables du système à l'instant  $t_2$  au moyen des équations du système et des valeurs des variables d'état à l'instant  $t_2$  que l'on vient de calculer.

En physique qualitative, deux problèmes nous empêchent d'utiliser cette méthode:

- 1.) La version qualitative de l'équation ci-dessus est insuffisante que pour donner une valeur qualitative unique à  $E(t_2)$ .

Ex: L'évaluation de la contrainte arithmétique

$$E(t_2) \text{ somme } ( E(t_1) , \partial E(t_1) )$$

(où l'on a laissé tomber  $(t_2 - t_1)$  car cette différence est toujours positive), dans la S-description

$$\{ \text{Signe}( E(t_1) \text{ positif} ) , \text{Signe}( \partial E(t_1) \text{ négatif} ) \}$$

renvoie la valeur "inconnu".



- 2.) De plus, même la connaissance des valeurs qualitatives des variables d'état n'est pas suffisante que pour déterminer la valeur des autres paramètres du système (cf tous les cas d'ambiguïté vus jusqu'ici): la propagation à travers les contraintes constitutives est ambiguë. Dans notre physique qualitative, il n'y a donc pas d'équivalent aux variables d'état de la physique classique. Cependant, ces variables vont jouer un rôle particulier dans notre application. Dès lors, pour les distinguer des autres paramètres du système, nous leurs donnons l'appellation "paramètres d'état".

Le deuxième problème a été résolu au point 5.3.2 lorsque nous avons parlé du traitement de l'ambiguïté. Le premier est solutionné en définissant, pour chaque paramètre d'état  $E$  du système, une contrainte constitutive particulière dont l'évaluation doit permettre de déterminer les valeurs possibles pour  $E(t_2)$ . Nous avons donné ci-dessus la version qualitative de l'équation du simulateur pour la variable d'état  $E$ . Cette contrainte arithmétique ne peut cependant pas être simplement ajoutée en tête de nos contraintes constitutives pour les raisons suivantes:

- La plupart du temps, l'évaluation de cette contrainte renverra la valeur "inconnu", ce qui ne nous permettra pas de limiter le nombre de descriptions possibles pour l'épisode  $t_2$ ;
- L'évaluation d'une contrainte arithmétique peut renvoyer des relations de magnitudes entre les opérandes qui sont ici  $E(t_1)$  et  $\partial E(t_1)$ . Ces relations n'ont pas de sens car nous avons simplifié l'équation du simulateur: les relations de magnitude qui auraient du sens seraient des relations de magnitude entre  $E(t_2)$ ,  $E(t_1)$  et  $(\partial E(t_1) / \partial t) * (t_2 - t_1)$ .

Pour apporter une solution à ce problème, nous définissons un nouvel opérateur, "**prédiction**", qui nous permettra de déterminer les valeurs de  $E(t_2)$  (voir b ci-dessous). A chaque paramètre d'état  $E$ , on associera la contrainte constitutive

$$E(t_2) \text{ prédiction } ( E(t_1) \partial E(t_1) ).$$

L'ensemble des contraintes constitutives des paramètres d'état sera placé devant celles des paramètres non d'état afin que l'information sur les paramètres d'état puissent être propagées lors de l'évaluation des contraintes constitutives (cf la simulation numérique).

## B) Contraintes de continuité

Les systèmes sur lesquels nous travaillons sont, par hypothèse, des systèmes à paramètres variant de manière continue dans le temps. Pour vérifier que les paramètres satisfont bien à cette hypothèse, nous définissons les règles suivantes (qui s'inspirent de la définition de la continuité chez Forbus):

### 1.1 Continuité dans les magnitudes

Soient deux quantités A et B, si une S-description D1 d'un système à un épisode E1 contient le n-uplet  $Mgn-inf(A\ B)$ , alors toute S-description représentant un futur possible de D1 à l'épisode suivant E2 ne peut renfermer le n-uplet  $Mgn-inf(B\ A)$ . Autrement dit, lorsque la relation d'ordre entre deux quantités changent, elle ne peut passer que de l'inégalité vers l'égalité ou inversement. Par contre, elle ne peut passer directement d'une inégalité à l'autre:

<u>Episode E1</u>		<u>Episode E2</u>
1) $m[A] < m[B]$	$\xRightarrow[\text{continu}]{\text{chgt}}$	$m[A] = m[B]$
2) $m[A] = m[B]$	$\xRightarrow[\text{continu}]{\text{chgt}}$	$m[A] < m[B]$ ou $m[A] > m[B]$
3) $m[A] < m[B]$	$\xRightarrow{\text{DISCONTINUITE}}$	$m[A] > m[B]$

### 2.1 Continuité dans les signes

Soit une quantité A, si une S-description D1 d'un système à un épisode E1 contient le n-uplet  $Signe(A\ \text{positif})$  [ou  $Signe(A\ \text{négatif})$ ], alors toute S-description représentant un futur possible de D1 à l'épisode suivant E2 ne peut renfermer le n-uplet  $Signe(A\ \text{négatif})$  [ou  $Signe(A\ \text{positif})$ ]. Autrement dit, lorsque le signe d'une quantité change, celui-ci ne peut passer directement de "positif" à "négatif" (ou inversement) sans passer par le signe "nul":



<u>Episode E1</u>		<u>Episode E2</u>	
1)	s[A] = positif	$\xrightarrow[\text{continu}]{\text{chgt}}$	s[A] = nul
2)	s[A] = nul	$\xrightarrow[\text{continu}]{\text{chgt}}$	s[A] = positif ou négatif
3)	s[A] = négatif	$\xrightarrow[\text{continu}]{\text{chgt}}$	s[A] = nul
4)	s[A] = positif	$\xrightarrow[\text{DISCONTINUITE}]{\text{chgt}}$	s[A] = négatif

Pour chaque n-uplet attaché à un épisode E1, les tableaux suivants indiquent les valeurs que ce n-uplet peut prendre à l'épisode suivant E2:

E1	E2	Mgn-inf(A B)	Mgn-égal(A B)	Mgn-inf(B A)
Mgn-inf(A B)		*	*	
Mgn-égal(A B)		*	*	*
Mgn-inf(A B)			*	*

E1	E2	Signe (A négatif)	Signe (A nul)	Signe (A positif)
Signe(A négatif)		*	*	
Signe(A nul)		*	*	*
Signe(A positif)			*	*

"\*" = continuité entre les relations d'ordre ou de signe des épisodes E1 et E2.

Les tableaux ci-dessus décrivent tous les changements continus possibles dans l'ordonnement de deux paramètres. Nous pouvons cependant déterminer ces changements de manière plus précise si nous connaissons le signe des dérivées de ces paramètres, et éventuellement la relation de magnitude entre ces dérivées. En effet, si la dérivée d'un paramètre est positive (négative), alors ce paramètre est en train d'augmenter (diminuer); si sa dérivée est nulle, alors elle ne bouge pas. De ceci, on peut déduire que la relation d'ordre entre deux magnitudes ne peut évoluer que si au moins une de ces deux magnitudes se déplace vers l'autre. Ceci peut être vérifié en comparant les signes des dérivées.

Ex: soient les deux paramètres A et B, leurs dérivées  $\partial A$  et  $\partial B$  et l'espace de quantité

{ Mgn-inf(A B) , Signe(A positif) , Signe(B positif) }

la relation de magnitude ne peut changer que si:

- |A| croît et |B| décroît ou ne bouge pas:  $\partial A$  est de signe positif et  $\partial B$  de signe négatif ou nul;
- |A| ne bouge pas et |B| décroît:  $\partial A$  est de signe nul et  $\partial B$  est de signe négatif;
- |B| croît mais |A| croît encore plus vite:  $\partial A$  et  $\partial B$  sont de signe positif mais  $|\partial B| < |\partial A|$
- |A| décroît mais |B| décroît encore plus vite:  $\partial A$  et  $\partial B$  sont de signe négatif mais  $|\partial A| < |\partial B|$

L'ensemble de ces règles sont représentées par les tableaux suivants:

soient les notations,  $s[P]$  et  $m[P]$ , désignant respectivement le signe et la magnitude du paramètre P,

Si  $|A| < |B|$  avec A et B positifs ou nuls:

$s[\partial A]$	$s[\partial B]$	-1	0	1
-1		(1)	<	<
0		=	<	<
1		=	=	(2)

(1): if  $m[\partial A] < m[\partial B]$ , then = ; else <

(2): if  $m[\partial B] < m[\partial A]$ , then = ; else <



Si  $|A| < |B|$  avec  $A$  et  $B$  négatifs ou nuls:

$s[\partial A]$	$s[\partial B]$	-1	0	1
-1		(3)	=	=
0		<	<	=
1		<	<	(4)

(3): if  $m[\partial B] < m[\partial A]$ , then = ; else <

(4): if  $m[\partial A] < m[\partial B]$ , then = ; else <

Si  $|A| = |B|$  avec  $A$  et  $B$  positifs:

$s[\partial A]$	$s[\partial B]$	-1	0	1
-1		(5)	<	<
0		>	=	<
1		>	>	(6)

(5): if  $m[\partial A] > m[\partial B]$ , then <

if  $m[\partial A] < m[\partial B]$ , then >

if  $m[\partial A] = m[\partial B]$ , then =

(6): if  $m[\partial A] < m[\partial B]$ , then <

if  $m[\partial A] > m[\partial B]$ , then >

if  $m[\partial A] = m[\partial B]$ , then =

Si  $|A| = |B|$  avec  $A$  et  $B$  négatifs:

$s[\partial A]$	$s[\partial B]$	-1	0	1
-1		(7)	>	>
0		<	=	>
1		<	<	(8)

(7): if  $m[\partial A] > m[\partial B]$ , then >

if  $m[\partial A] < m[\partial B]$ , then <

if  $m[\partial A] = m[\partial B]$ , then =

(8): if  $m[\partial A] < m[\partial B]$ , then >

if  $m[\partial A] > m[\partial B]$ , then <

if  $m[\partial A] = m[\partial B]$ , then =

Si  $|A| = |B|$  avec  $A$  et  $B$

nuls:

if  $m[\partial A] < m[\partial B]$ , then <

if  $m[\partial A] = m[\partial B]$ , then =

if  $m[\partial B] < m[\partial A]$ , then >

A ces règles de continuité, nous en ajoutons encore une:

*"Parmi tous les changements possibles dans l'ordonnement de tous les paramètres, les changements à partir de l'égalité s'effectueront avant les changements vers l'égalité".*

Ceci correspond à la loi des changements d'égalité de Forbus. Pour rappel, elle se justifie par le fait qu'un changement hors de l'égalité s'effectue en un instant alors que celui vers l'égalité a besoin d'un intervalle de temps pour se réaliser.



Ex: Soit l'espace de quantité

{ Mgn-inf(A B) , Mgn-égal(B C) , Signe(A positif) ,  
Signe(B positif) , Signe(C positif) ,  
Signe( $\partial A$  positif) , Signe( $\partial B$  nul) , Signe( $\partial C$  positif) }

les changements possibles sont:

- A devient égal à B;
- B devient inférieur à C;
- A devient égal à C.

Les deux derniers changements ci-dessus ne peuvent se produire simultanément parce ce qu'il impliquerait que A deviennent supérieur à B alors qu'il lui était inférieur ( $\Rightarrow$  Discontinuité). La loi ci-dessus permet d'éviter ce problème puisqu'elle désigne un seul changement possible pour l'épisode suivant: "B devient inférieur à C".

### C) Prédiction des valeurs des paramètres d'état

Dans l'ensemble minimal de nos contraintes constitutives (point 5.2.2 C), la valeur des dérivées de chaque paramètre d'état du système est définie par une contrainte constitutive. Ceci signifie que dans l'arbre d'évaluation des contraintes constitutives, chaque S-description complète renferme le signe de la dérivée de chaque paramètre d'état.

Avec ces signes et les contraintes de continuité, nous sommes capables de déterminer un ensemble initial de changements dans l'espace de quantité. Pour cela, nous définissons l'opérateur "**prédiction**" qui donnera l'ensemble des nouvelles valeurs possibles d'un paramètre en fonction de son espace de quantité, de celui de sa dérivée, des contraintes de continuité et de la S-description complète de l'épisode précédent.

Les contraintes des paramètres d'état étant placées en tête (et dans un ordre quelconque) de la liste des contraintes constitutives, leur évaluation donnera les nouvelles valeurs des paramètres d'état. La propagation de celles-ci à travers les contraintes constitutives nous donnera les nouvelles valeurs possibles de tous les paramètres non d'état et nous permettra ainsi d'obtenir toutes les nouvelles S-descriptions complètes possibles du système.

### D) Arbre continu et noeuds morts

Comme pour les contraintes de valeurs imposées, il faudra vérifier que les contraintes de continuité sont bien satisfaites par tous les paramètres du système. Lors de l'évaluation de la contrainte constitutive

<rés> <opér> (op1 op2) ,



il faudra comparer les n-uplets obtenus:

Signe(<rés> sgn) , Mgn-inf(....) , ...

avec les n-plets de l'épisode précédent. Ceci sera fait automatiquement dans le cas des paramètres d'état puisque c'est le rôle de l'opérateur "prédiction" de la contrainte constitutive de ces paramètres. Par contre, dans le cas des autres paramètres, cette vérification n'est pas faite par l'opérateur de la contrainte constitutive. Or, il est possible que la conjonction de certains changements parmi les paramètres d'état provoque des changements discontinus dans les autres paramètres. Dès lors, il conviendra de vérifier si les règles de continuité sont respectées lors de chaque évaluation des contraintes constitutives des paramètres non d'état. Si l'on observe une discontinuité, la S-description en ce noeud ne constitue pas un des futurs possibles de l'épisode précédent. Dès lors, le noeud associé à l'évaluation de cette contrainte sera dit mort (cf 5.3.3 B).

L'arbre construit en évaluant la liste des contraintes constitutives dans une S-description D' de l'épisode E' et en respectant les contraintes de continuité par rapport à une S-description complète D de l'épisode précédent E sera appelé: **arbre d'évaluation des contraintes constitutives dans D' et continu avec D.**

#### E) Définition du diagramme des épisodes

Les différentes descriptions possibles du système à travers le temps seront représentées comme suit:

- La S-description en chaque feuille (non morte) d'un arbre A1 d'évaluation des contraintes constitutives décrit une situation possible du système au cours d'un épisode E1. Soit F1 une telle feuille.
- Les futurs possibles de la S-description D1 en F1 au cours de l'épisode E2 (suivant E1) sont représentés par l'arbre A2 d'évaluation des contraintes constitutives dans la S-description D2 et continu avec la S-description D. Si l'on souhaite n'obtenir que certains futurs particuliers, alors D2 contiendra les n-uplets décrivant les futurs désirés (cf valeurs de contraintes imposées; sinon D2 sera la S-description vide { }).
- L'arbre A2 est attaché à la feuille F1. Dès lors, les parcours en profondeur à partir de F1 donne toutes les descriptions possibles des futurs de F1.
- En faisant ceci pour chaque feuille de A1, on obtient ainsi une représentation de tous les futurs possibles des situations de l'épisode E1 décrites par A1.
- En réitérant ce processus pour chaque feuille du nouvel arbre ainsi obtenu au cours de plusieurs épisodes successifs, nous obtenons le **diagramme des épisodes**. Un parcours en profondeur de celui-ci fournit la description d'un comportement possible du dispositif au cours de ces épisodes.



#### 5.4 RAISONNEMENT CAUSAL

Le diagramme des épisodes d'un système est une structure nous permettant facilement de représenter le comportement d'un système:

- Pour présenter les futurs possibles d'un système se trouvant dans une situation donnée, il suffit de partir du noeud associé à cette association et de nous balader à travers les successeurs de ce noeud;
- Pour comprendre pourquoi une variable change de signe ou devient plus grande qu'une autre, il suffit de remonter dans les noeuds prédécesseurs de l'arbre d'évaluation et de regarder les n-uplets décrivant les hypothèses faites et la valeur des autres variables.

Plus fondamental, est la manière dont ce diagramme des épisodes a été construit. Celle-ci procure certains avantages à notre type de raisonnement. En effet, les propriétés des graphes de liaison causaux, nous ont suggéré le développement d'une méthode originale de prévision du comportement des dispositifs physiques. Contrairement aux autres méthodes que nous avons pu découvrir dans la littérature, celle-ci fait appel à un ordre pré-établi dans la satisfaction des contraintes. Cet ordre est imposé par le graphe de liaison causal (GLC). Le premier avantage de notre méthode est la simplification du problème de satisfaction des contraintes. En effet, l'ordre défini par le GLC permet de ne calculer la valeur d'un paramètre que lorsque la valeur des variables nécessaires à son calcul ont déjà été déterminée. Ceci justifie l'hypothèse faite au point 5.3.2 : "lors de l'évaluation d'une contrainte, le signe de toutes les opérandes de cette contrainte sont connus". Par contre, lorsque De Kleer et Brown recherche une solution à un ensemble de confluences, ( ensemble non-ordonné ) ils ont recours à une méthode sophistiquée, à savoir une combinaison de la méthode de propagation de contraintes et de "generate and test". On peut néanmoins constater que notre méthode reste globalement complexe, mais ceci est dû à la richesse de notre espace de quantité.

Le second avantage que nous avons relevé est lié à la génération des raisonnements de type causal. L'ordre de satisfaction des contraintes suggéré par les graphes de liaison causaux correspond à la causalité mythique de De Kleer et Brown. Si l'on est contraint d'introduire des hypothèses pour poursuivre l'évaluation des contraintes, l'introduction de celles-ci est locale et non-aléatoire, contrairement à l'envisonnement de De Kleer et Brown. Par ailleurs, les raisonnements que l'on peut ainsi construire sont uniques, ce qui est bien en accord avec le principe qu'un effet n'a qu'une seule cause. Tout ceci nous permet de penser que les raisonnements ainsi générés seront bien en accord avec la causalité ( mythique ). Ajoutons encore que si l'on est amené à construire un raisonnement par l'absurde, ceci est dû aux contraintes constitutives ou aux contraintes sur les valeurs imposées, mais pas aux contraintes de continuité. Le raisonnement par l'absurde constitue un obstacle à la causalité. Il faut néanmoins remarquer que nous ne sommes pas parvenus à produire un raisonnement par l'absurde par la méthode de De Kleer et Brown, lorsque nous avons tenté de l'appliquer à l'exemple du ventricule gauche isolé. Il semblerait que les modèles dont la topologie peut

être exprimée sous la forme d'un graphe de liaison causal, ne présentent pas d'ambiguïté locale pour l'envisonnement de De Kleer. Ceci n'est cependant pas démontré.

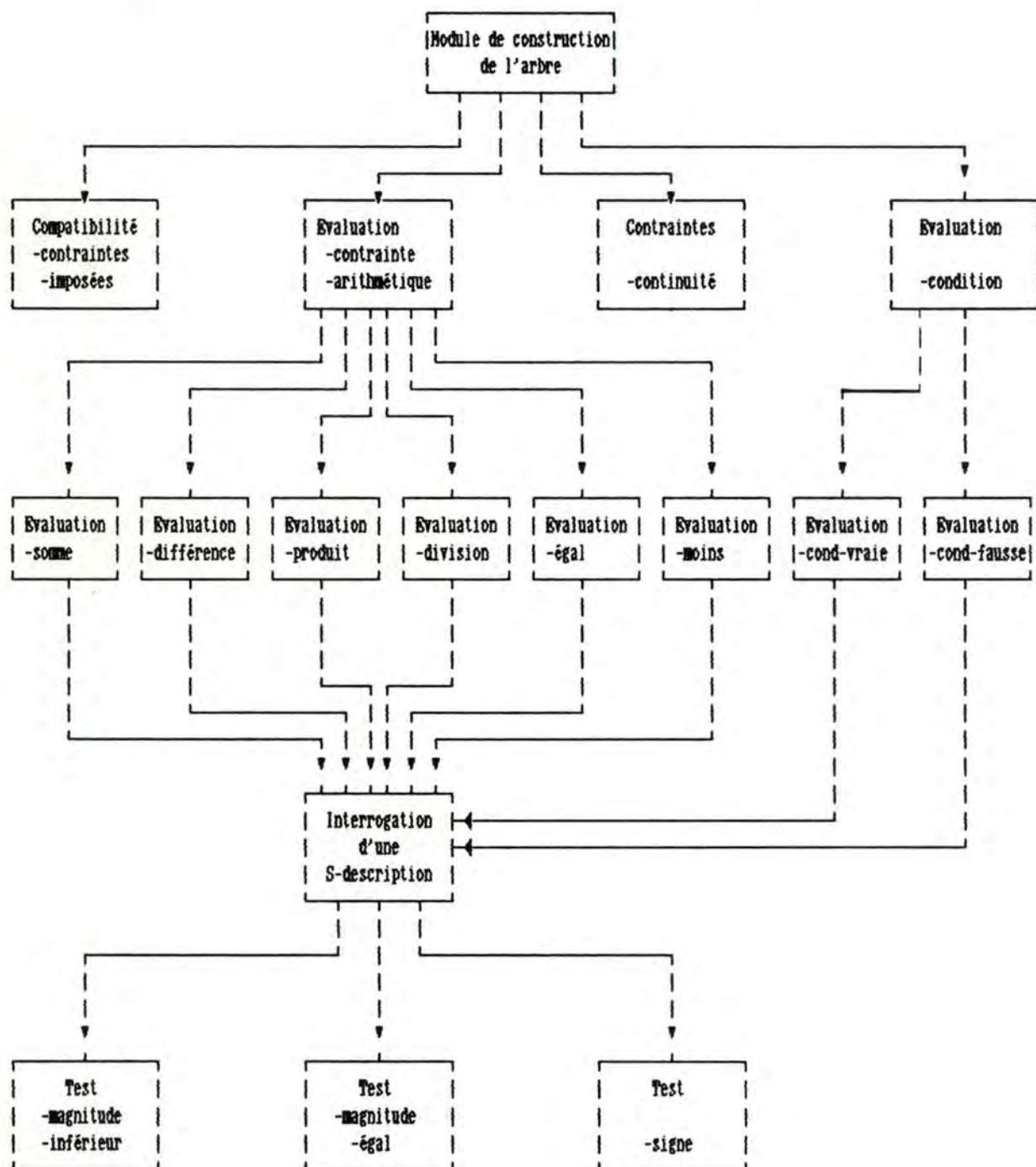
Nous avons présenté certains avantages de notre démarche. N'oublions cependant pas qu'elle est limitée à une classe particulière de dispositifs, les dispositifs à paramètres localisés, dont le graphe de liaison peut être augmenté en graphe de liaison causal.



## CHAP 6 REALISATION DU SIMULATEUR QUALITATIF

Dans ce chapitre, nous présentons l'architecture des modules de notre simulateur qualitatif, ainsi que la spécification de ces modules. Ces spécifications se baseront largement sur les notions développées au chapitre 5.

### 6.1 ARCHITECTURE DU SIMULATEUR QUALITATIF



## 6.2 MODULE DE CONSTRUCTION DE L'ARBRE D'EVALUATION

Arbre-éval := CONSTR-ARBRE (L-const , L-imposées ,  
L-état-précédent)

### ARGUMENTS

*L-const* : une liste de contraintes constitutives ;  
*L-imposées* : une S-description d'un épisode E2 ;  
*L-état-précédent* : une S-description d'un épisode E1 ;

### PRECONDITIONS

*L-état-précédent* : Cette S-description doit être une S-description complète de l'épisode E1 ;

*L-imposées* doit être une S-Description cohérente, c'est-à-dire,

- Un paramètre ne peut avoir qu'un seul signe.
- Soient x et y, deux paramètres. Il est impossible de déduire simultanément de L-imposées :

1. Mgn-inf(x y) et Mgn-inf(y x)
2. Mgn-inf(x y) et Mgn-egal(x y)

### RESULTAT

Arbre-éval : une liste.

### POSTCONDITIONS

Arbre-éval est l'arbre d'évaluation de la liste de contraintes constitutives *L-const* dans la S-description *L-imposées* et continu avec la S-description de l'état précédent *L-état-précédent*.

## 6.3 MODULE D'EVALUATION DES CONTRAINTES ARITHMETIQUES

Conséquences := EVAL-CONTR-ARITH (Contr , Descrip)

### ARGUMENTS

*Contr* : une contrainte arithmétique.  
*Descript* : une S-description.



### PRECONDITIONS

Pour tout  $x$  tel que  $x$  est une opérande de *Contr*, il existe un  $n$ -uplet *Signe* ( $x$  < *sgn* >) dans la *S-description* *Descript*.

### RESULTAT

*Conséquences* : une *S-description*.

### POSTCONDITIONS

Si *Contr* = ( $x$  somme ( $y$ ,  $z$ ))  
alors *Conséquences* := EVAL-SOMME ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ , *Descript*) ;

Si *Contr* = ( $x$  différence ( $y$ ,  $z$ ))  
alors *Conséquences* := EVAL-DIFFERENCE ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ , *Descript*) ;

Si *Contr* = ( $x$  produit ( $y$ ,  $z$ ))  
alors *Conséquences* := EVAL-PRODUIT ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ , *Descript*) ;

Si *Contr* = ( $x$  division ( $y$ ,  $z$ ))  
alors *Conséquences* := EVAL-DIVISION ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ , *Descript*) ;

Si *Contr* = ( $x$  égal ( $y$ ,  $z$ ))  
alors *Conséquences* := EVAL-EGAL ( $x$ ,  $y$ , *Descript*) ;

Si *Contr* = ( $x$  moins  $y$ )  
alors *Conséquences* := EVAL-MOINS ( $x$ ,  $y$ , *Descript*) .

## 6.4 MODULE EVALUATION-SOMME

*Conséquences* := EVAL-SOMME ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ , *Descript*)

### ARGUMENTS

$x, y, z$  : noms de paramètre ;  
*Descript* : une *S-description* ;

### PRECONDITIONS

Il existe des  $n$ -uplets *Signe*( $y$  < *sgn-1* >) et *Signe*( $z$  < *sgn-2* >) appartenant à *Descript* avec < *sgn-1* > et < *sgn-2* >  $\in$  Signes \ {inconnu}.

### RESULTATS

*Conséquences* : une *S-description* ;

## POSTCONDITIONS

Si tous les n-uplets d'une colonne d'entrée de la table d'évaluation associée à l'opérateur "somme" peuvent être déduits de *Descript*, alors *Conséquences* vaut l'ensemble des n-uplets de la colonne de sortie correspondante.

Cette table est la suivante:

z somme (x y)	SOUCHE	ENTREES												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
S  I	Signe (x positif)	*	*	*	*	*								
	Signe (x nul)						*	*	*					
	Signe (x négatif)									*	*	*	*	*
	Signe (y positif)	*					*			*	*	*		
	Signe (y nul)		*					*					*	
	Signe (y négatif)			*	*	*			*					*
	Mgn-inf (x y)			*						*				
	Mgn-égal (x y)				*						*			
	Mgn-inf (y x)					*						*		
A L O R S	Signe (z positif)	*	*		*		*			*				
	Signe (z nul)					*		*				*		
	Signe (z négatif)			*					*		*		*	*
	Mgn-inf (z x)				*						*			
	Mgn-égal (z x)		*										*	
	Mgn-inf (x z)	*												*
	Mgn-inf (z y)			*						*				
	Mgn-égal (z y)					*		*						
	Mgn-inf (y z)	*	*											*

S'il n'existe pas de colonne d'entrée de la table d'évaluation dont tous les n-uplets peuvent être déduits de *Descript* alors *Conséquences* ne contient qu'un seul élément : *Signe( x inconnu )*.

## 6.5 MODULE EVALUATION-DIFFERENCE

*Conséquences* := EVAL-DIFFERENCE (x , y , z , *Descript*)

### ARGUMENTS

x, y, z : noms de paramètre ;  
*Descript* : une S-description ;



### PRECONDITIONS

Il existe des n-uplets  $\text{Signe}(y \langle \text{sgn-1} \rangle)$  et  $\text{Signe}(z \langle \text{sgn-2} \rangle)$  appartenant à *Descript* avec  $\langle \text{sgn-1} \rangle$  et  $\langle \text{sgn-2} \rangle \in \text{Signes} \setminus \{\text{inconnu}\}$ .

## RESULTATS

**Conséquences:** une S-description ;

### POSTCONDITIONS

Si tous les n-uplets d'une colonne d'entrée de la table d'évaluation associée à l'opérateur "différence" peuvent être déduits de *Descript*, alors *Conséquences* vaut l'ensemble des n-uplets de la colonne de sortie correspondante.

Cette table est la suivante:

[illegible]

S'il n'existe pas de colonne d'entrée de la table d'évaluation dont tous les n-uplets peuvent être déduits de *Descript* alors *Conséquences* ne contient qu'un seul élément : *Signe( x inconnu )*.

## 6.6 MODULE EVALUATION-PRODUIT

*Conséquences* := EVAL-PRODUIT (x , y , z , *Descript*)

### ARGUMENTS

x, y, z : noms de paramètre ;  
*Descript* : une S-description ;

### PRECONDITIONS

Il existe des n-uplets *Signe*(y <sgn-1>) et *Signe*(z <sgn-2>) appartenant à *Descript* avec <sgn-1> et <sgn-2> ∈ *Signes* \ {inconnu}.

### RESULTATS

*Conséquences* : une S-description ;

### POSTCONDITIONS

Si tous les n-uplets d'une colonne d'entrée de la table d'évaluation associée à l'opérateur "produit" peuvent être déduits de *Descript*, alors *Conséquences* vaut l'ensemble des n-uplets de la colonne de sortie correspondante.

Cette table est la suivante:

z prod x y	SOUCHE	ENTREES					
		1	2	3	4	5	6
S	Signe (x positif)	*	*				
	Signe (x nul)			*			
I	Signe (x négatif)				*	*	
	Signe (y positif)	*			*		
	Signe (y nul)						*
	Signe (y négatif)		*			*	
	Signe (z positif)	*				*	
	Signe (z nul)			*			*
	Signe (z négatif)		*		*		



## 6.7 MODULE EVALUATION-DIVISION

*Conséquences* := EVAL-DIVISION (x , y , z , *Descript*)

### ARGUMENTS

x, y, z : noms de paramètre ;  
*Descript* : une S-description ;

### PRECONDITIONS

Il existe des n-uplets *Signe*(y <sgn-1>) et *Signe*(z <sgn-2>) appartenant à *Descript* avec <sgn-1> et <sgn-2> ∈ Signes \ {inconnu} et avec *Signe* (y <sgn-1>) différent de *Signe* (y nul) ;

### RESULTATS

*Conséquences* : une S-description ;

### POSTCONDITIONS

Si tous les n-uplets d'une colonne d'entrée de la table d'évaluation associée à l'opérateur "division" peuvent être déduits de *Descript*, alors *Conséquences* vaut l'ensemble des n-uplets de la colonne de sortie correspondante.

Cette table est la suivante:

z divis x y	SOUCHE	ENTREES				
		1	2	3	4	5
S	<i>Signe</i> (x positif)	*	*			
	<i>Signe</i> (x nul)			*		
I	<i>Signe</i> (x négatif)				*	*
	<i>Signe</i> (y positif)	*			*	
	<i>Signe</i> (y négatif)		*			*
	<i>Signe</i> (z positif)	*				*
	<i>Signe</i> (z nul)			*		
	<i>Signe</i> (z négatif)		*		*	

### REMARQUE.

Il est évident que dans l'état actuel des choses, il y a une grande perte d'information dans les produits et les division. En effet, prenons les contraintes ( x1 produit (k y1) ) et ( x2 produit (k y2) ) : si on sait que *Mgn-inf*(y1 y2) alors on peut déduire *Mgn-inf*(x1 x2).

Nous suggérons donc les règles suivantes pour pouvoir récupérer ce type d'information.

Si on doit évaluer la contrainte (  $x_2$  produit (  $k_2$   $y_2$  ) ) et que la contrainte (  $x_1$  produit (  $k_1$   $y_1$  ) ) a déjà été évaluée alors il est possible de déduire des n-uplets des relations Mgn-inf et Mgn-égal au moyen du tableau suivant :

	SOUCHE	ENTREES						
		1	2	3	4	5	6	7
S	Mgn-égal ( $k_1$ $k_2$ )	*	*	*				
	Mgn-inf ( $k_1$ $k_2$ )				*	*		
I	Mgn-inf ( $k_2$ $k_1$ )						*	*
	Mgn-égal ( $y_1$ $y_2$ )	*			*		*	
	Mgn-inf ( $y_1$ $y_2$ )		*			*		*
	Mgn-inf ( $y_2$ $y_1$ )			*				
A								
L	Mgn-egal ( $x_1$ $x_2$ )	*						
O	Mgn-inf ( $x_1$ $x_2$ )		*		*	*		
R	Mgn-inf ( $x_2$ $x_1$ )			*			*	*
S								

Il faudrait également des règles analogues pour "division" et entre "produit" et "division". Tout ceci n'a cependant pas encore été implémenté.

## 6.8 MODULE EVALUATION-EGAL

Conséquences := EVAL-EGAL (  $x$  ,  $z$  , *Descript* )

### ARGUMENTS

$x, z$  : noms de paramètre ;  
*Descript* : une S-description ;

### PRECONDITIONS

Il existe un n-uplet Signe (  $x$  <sgn> ) appartenant à *Descript* avec <sgn>  $\in$  Signes \ {inconnu} ;

### RESULTATS

Conséquences : une S-description ;



### POSTCONDITIONS

*Conséquences* est constitué des deux éléments *Signe(z sgn)* et *Mgn-égal(x z)*.

z égal x	SOUCHE	ENTREES		
		1	2	3
S	Signe (x positif)	*		
	Signe (x nul)		*	
I	Signe (x négatif)			*
	Signe (z positif)	*		
	Signe (z nul)		*	
	Signe (z négatif)			*
	Mgn-egal(x z)	*	*	*

### 6.9 MODULE EVALUATION-MOINS

*Conséquences* := EVAL-MOINS (x , z , *descript*)

#### ARGUMENTS

x z : noms de paramètre ;  
*Descript* : une S-description ;

#### PRECONDITIONS

Il existe un n-uplet *Signe (x <sgn>)* appartenant à *Descript*  
avec <sgn> ∈ Signes \ {inconnu} ;

#### RESULTATS

*Conséquences* : une S-description ;

#### POSTCONDITIONS

Si un n-uplet d'une colonne d'entrée de la table d'évaluation associée à l'opérateur "moins" peut être déduit de *Descript*, alors *Conséquences* vaut l'ensemble comprenant les n-uplets de la colonne de sortie correspondante.

Cette table est la suivante:

z moins x	<u>SOUCHE</u>	<u>ENTREES</u>		
		1	2	3
S	Signe (x positif)	*		
	Signe (x nul)		*	
I	Signe (x négatif)			*
	Signe (z positif)			*
	Signe (z nul)		*	
	Signe (z négatif)	*		
	Mgn-egal (x z)	*	*	*



## 6.10 MODULE EVALUATION-CONDITION

*(Liste-1 , Liste-2) := EVAL-CONDITION (Cond , Descript)*

### ARGUMENTS

*Cond* : une condition;  
*Descript* : une S-description ;

### PRECONDITIONS

Néant;

### RESULTATS

*Liste-1* : une S-description ;  
*Liste-2* : une S-description ;

### POSTCONDITIONS

*Liste-1* := HYP-COND-VRAIE (*Cond* , *Descript*)  
*Liste-2* := HYP-COND-FAUSSE (*Cond* , *Descript*)

## 6.11 MODULE EVALUATION-CONDITION-VRAIE

*Liste-hyp-T* := HYP-COND-VRAIE (*Cond* , *Descript*)

### ARGUMENTS

*Cond* : une condition;  
*Descript* : une S-description ;

### PRECONDITIONS

Néant.

### RESULTATS

*Liste-hyp-T* : une S-description ;

### POSTCONDITIONS

*Liste-hyp-T* est la liste H-TRUE pour l'évaluation de *Cond* dans *Descript*;

## 6.12 MODULE EVALUATION-CONDITION-FAUSSE

*Liste-hyp-F* := HYP-COND-FAUSSE (*Cond* , *Descript*)

### ARGUMENTS

*Cond* : une condition ;  
*Descript* : une S-description ;

### PRECONDITIONS

Néant.

### RESULTATS

*Liste-hyp-F* : une S-description ;

### POSTCONDITIONS

*Liste-hyp-F* est la liste H-FALSE pour l'évaluation de *Cond* dans *Descript*;

## 6.13 MODULE D'INTERROGATION D'UNE S-DESCRIPTION

(*Déduit* , *N'*) := TEST-RELATION (*N* , *Descript*)

### ARGUMENTS

*N* : un n-uplet ;  
*Descript* : une S-description ;

### PRECONDITIONS

*N* est un n-plet des relations MGN-INF, MGN-EGAL ou SIGNE :

*N* = <RELATION>(<arg-1><arg-2>)  
avec <arg-1> ∈ Paramètres,  
      <arg-2> ∈ Paramètres U Signes,  
      <arg-1> et <arg-2> pouvant ne pas être instantiés;

### RESULTATS

*Déduit* : un booléen ;  
*N'* : un n-uplet ;



### POSTCONDITIONS

Si  $\langle \text{RELATION} \rangle = \text{MGN-INF}$ ,  
alors:  
     $(\text{Dédruit} , N') := \text{MGN-INF-SACHANT} (N , \text{Descript})$

Si  $\langle \text{RELATION} \rangle = \text{MGN-EGAL}$ ,  
alors:  
     $(\text{Dédruit} , N') := \text{MGN-EGAL-SACHANT} (N , \text{Descript})$

Si  $\langle \text{RELATION} \rangle = \text{SIGNE}$ ,  
alors:  
     $(\text{Dédruit} , N') := \text{SIGNE-SACHANT} (N , \text{Descript})$

### 6.14 MODULE TEST-MGN-INFERIEUR

$(\text{Dédruit} , N') := \text{MGN-INF-SACHANT} (N , \text{Descript})$

### ARGUMENTS

$N$  : un n-uplet ;  
 $\text{Descript}$  : une S-description ;

### PRECONDITIONS

$N$  est un n-plet de la relation MGN-INF :

$N = \text{MGN-INF}(\langle \text{par-1} \rangle \langle \text{par-2} \rangle)$  avec  $\langle \text{par-1} \rangle , \langle \text{par-2} \rangle \in \text{Paramètres}$  ;  
 $\langle \text{par-1} \rangle$  et  $\langle \text{par-2} \rangle$  pouvant ne pas être instantiés ;

### RESULTATS

$\text{Dédruit}$  : un booléen ;  
 $N'$  : un n-uplet ;

### POSTCONDITIONS

Si il existe une instantiation de  $N$ ,  $(\text{MGN-INF}(\langle \text{par-1} \rangle \langle \text{par-2} \rangle))'$ , appartenant à  $\text{Descript}$  ou pouvant être déduite de  $\text{Descript}$ ,

alors:  
     $\text{Dédruit} = \text{TRUE}$   
     $N' = (\text{MGN-INF}(\langle \text{par-1} \rangle \langle \text{par-2} \rangle))'$

sinon:  
     $\text{Dédruit} = \text{FALSE}$   
     $N' = N$

## 6.15 MODULE TEST-MGN-EGAL

$(D\acute{e}duit, N') := MGN-EGAL-SACHANT (N, Descript)$

### ARGUMENTS

$N$  : un n-uplet ;  
 $Descript$  : une S-description ;

### PRECONDITIONS

$N$  est un n-plet de la relation MGN-EGAL :

$N = MGN-EGAL(\langle par-1 \rangle \langle par-2 \rangle)$  avec  $\langle par-1 \rangle, \langle par-2 \rangle \in Param\grave{e}tres$  ;  
 $\langle par-1 \rangle$  et  $\langle par-2 \rangle$  pouvant ne pas ˆtre instantiés ;

### RESULTATS

$D\acute{e}duit$  : un booléen ;  
 $N'$  : un n-uplet ;

### POSTCONDITIONS

Si il existe une instantiation de  $N$ ,  $(MGN-EGAL(\langle par-1 \rangle \langle par-2 \rangle))'$ , appartenant    $Descript$  ou pouvant ˆtre déduite de  $Descript$ ,

alors:

$D\acute{e}duit = TRUE$   
 $N' = (MGN-EGAL(\langle par-1 \rangle \langle par-2 \rangle))'$

sinon:

$D\acute{e}duit = FALSE$   
 $N' = N$

## 6.16 MODULE TEST-SIGNE

$(D\acute{e}duit, N') := SIGNE-SACHANT (N, Descript)$

### ARGUMENTS

$N$  : un n-uplet ;  
 $Descript$  : une S-description ;



## PRECONDITIONS

$N$  est un  $n$ -plet de la relation SIGNE :

$N = \text{MGN-SIGNE} (\langle \text{par-1} \rangle \langle \text{sgn} \rangle)$  avec  $\langle \text{par} \rangle \in \text{Paramètres}$ ,  
 $\langle \text{sgn} \rangle \in \text{Signes}$ ,  
 $\langle \text{par} \rangle$  et  $\langle \text{sgn} \rangle$  pouvant ne pas être instantiés;

## RESULTATS

*Déduit* : un booléen ;

$N'$  : un n-uplet :

### POSTCONDITIONS

Si il existe une instantiation de  $N$ , (SIGNE( $\langle \text{par} \rangle \langle \text{sgn} \rangle$ ))', appartenant à  $\text{Descript}$  ou pouvant être déduite de  $\text{Descript}$ .

alors:

Déduit = TRUE  
N' = (SIGNE(<par><sgn>))'

sinon:

Déduit = FALSE  
N' = N

## 6.17 MODULE COMPATIBILITE-CONTRAINTES-IMPOSEES

(Compatible) := COMP-CONTR-IMP (Conséquences, L-imposées)

## ARGUMENTS

Conséquences : une S-description :

*L-imposées* : une S-description ;

### PRECONDITIONS

*Conséquences* est la S-description renfermant les n-uplets de l'évaluation d'une contrainte arithmétique ;

*L-imposées* doit être une *S-description* cohérente (cf 6.2) ;

## RESULTS

*Compatible* : un booléen ;

## POSTCONDITIONS

```

Si les n-uplets de Conséquences sont compatibles avec ceux de L-
imposées, alors Compatible = TRUE ;
sinon Compatible = FALSE .

```

## 6.18 MODULE CONTRAINTES-CONTINUITE

$(L\text{-}chgts\text{-}cont) := CONTINUE (N, Descript\text{-}E1)$

### ARGUMENTS

$N$  : un n-uplet de l'épisode  $E2$ ;

$Descript\text{-}E1$  : une S-description complète de l'épisode  $E1$  ;

### PRECONDITIONS

$N$  est un n-uplet d'une des relations MGN-INF , MGN-EGAL ou SIGNE ;  
 $E2$  est l'épisode suivant  $E1$  ;

### RESULTATS

$L\text{-}chgts\text{-}cont$  : un ensemble de n-uplets ;

### POSTCONDITIONS

$L\text{-}chgts\text{-}cont$  est l'ensemble de n-uplets décrivant les changements continus avec  $Descript\text{-}E1$  pouvant survenir, au cours de l'épisode  $E2$ , dans la relation exprimée par  $N$ . Les règles de continuité ont été définies au point 5.3.4 B (voir tableaux).



## CHAP 7 CONCLUSION

Comment peut-on déduire la description du comportement d'un dispositif physique à partir d'une description de sa structure? Cette question se trouve au centre de la physique qualitative et celle-ci a pour ambition d'y apporter une solution. Bien qu'il n'existe pas d'approche unique pour résoudre ce problème, toutes ont néanmoins certains principes en commun. Primo, la description d'un dispositif physique est constituée d'un ensemble de contraintes sur les paramètres de ses composants. Secundo, la prévision du comportement du dispositif est réalisée par un algorithme de satisfaction de contraintes.

Nous partageons ces deux principes. Ce qui distingue notre approche personnelle des autres travaux dont nous avons pu prendre connaissance, c'est la méthode utilisée pour satisfaire nos contraintes. En effet, nous étant limités aux dispositifs physiques dont la topologie peut être exprimée sous la forme d'un graphe de liaison causal, nous pouvons à priori établir un ordre dans la satisfaction de nos contraintes. Il en résulte une certaine simplification du problème. Cependant, l'intérêt essentiel de cette méthode est de pouvoir générer des raisonnements, non pas compatibles avec la causalité (la forme acausale des lois de la physique nous l'interdit), mais en accord avec la causalité mythique de De Kleer et Brown. Ceci est essentiel si l'on a pour objectif la génération de raisonnements compatibles avec le sens commun.

La structure que nous avons donnée à notre méthode de satisfaction de contraintes ne nous satisfait cependant pas encore entièrement. Nous avons choisi de représenter les contraintes sous la forme d'une liste triée suivant l'ordre de satisfaction. Une solution conceptuellement plus élégante consisterait à associer à chaque composant physique son ensemble de contraintes. On pourrait par exemple songer à une implémentation sous forme de frames. L'algorithme de satisfaction de contraintes travaillerait alors directement sur une représentation du graphe de liaison causal du dispositif pour choisir la contrainte suivante à satisfaire.

Nous avons développé notre méthode de satisfaction de contraintes dans le cadre de la réalisation d'un simulateur qualitatif. Un simulateur qualitatif détermine l'évolution du comportement d'un dispositif à partir de la description d'une situation initiale. Signalons que nous aurions pu choisir une autre démarche, par exemple réaliser de l'"envisionnement" tel De Kleer et Brown. Un programme d'envisionnement établit d'emblée tous les comportements que le dispositif peut éventuellement adopter.

L'implémentation de notre simulateur qualitatif n'a pas pu être menée entièrement à terme. Lorsque nous avons décidé de nous interrompre pour rédiger les résultats de nos travaux, nous oeuvrions à l'implémentation du module de construction de l'arbre d'évaluation, arbre constituant en quelque sorte le canevas du raisonnement. Nous rappelons que si nous avons choisi une structure d'arbre pour représenter le résultat de l'évaluation des contraintes c'est en raison de l'ambiguïté de l'analyse qualitative qui impose l'introduction d'hypothèses.



A l'issue de ce mémoire, nous devons faire le point sur l'état d'avancement de nos travaux. Nous pouvons ainsi résumer la situation : les modules du calcul qualitatif sont implémentés, mais pas le module assemblant les résultats de ces opérations qualitatives pour constituer les arbres d'évaluation.

Nous avons recouru à micro-PROLOG fonctionnant sous MS-DOS pour l'implémentation de notre simulateur qualitatif. Si notre objectif est simplement de dégager des principes, micro-PROLOG peut très bien convenir, malgré son éditeur vraiment fastidieux et l'absence d'aide à la mise-au-point efficace. Cependant il est hors de question d'intégrer notre simulateur qualitatif dans une application effective si celui-ci est développé en micro-PROLOG. Nous ne serions certainement pas dithyrambiques en parlant de ses performances...

Il serait fort utile de pouvoir achever l'implémentation du module de construction des arbres d'évaluation. Nous pourrions vérifier si les arbres ainsi constitués forment bien un canevas valable pour une explication de la prévision du comportement du dispositif. Si c'est le cas, la construction d'un interface convivial, exposant et justifiant la prévision du comportement à l'utilisateur, serait à envisager.

A moyen terme, le développement des autres fonctions exposées au chapitre 4 seraient souhaitable si l'on veut se doter d'une "boîte-à-outils" suffisamment complète que pour pouvoir analyser le comportement d'un dispositif physique de manière satisfaisante. Il s'agit par exemple de pouvoir analyser les réactions d'un dispositif physique en cas de perturbation, détecter les nouveaux états d'équilibre, etc...

Dans une perspective à long terme, la réalisation de cette "boîte-à-outils" pourrait déboucher sur le développement d'applications plus conséquentes. Nous songeons par exemple à la réalisation de systèmes experts pour lesquels les connaissances des mécanismes fondamentaux de la physiologie seraient représentées dans une bibliothèque de modèles. Ces systèmes se serviraient alors de leurs outils d'analyse de modèles dans l'établissement de leurs diagnostics, pronostics et propositions de thérapies. Ceci n'exclut évidemment pas le recours aux bases de connaissances traditionnelles, mieux adaptées à la représentation des connaissances du jugement.

La seconde application importante qui pourrait s'en suivre est relative à l'enseignement des connaissances fondamentales, par exemple l'enseignement des notions de base de la physiologie lorsque celles-ci peuvent être exprimées sous une forme mécaniste. Nous jugeons cette application fort utile. Il est en effet indispensable de pouvoir mettre l'étudiant en présence de raisonnements complets et bien structurés afin qu'il puisse acquérir une méthode de raisonnement valable. Ce système supporterait donc efficacement l'enseignant dans sa tâche. En outre, il permettrait également un enseignement plus personnalisé. C'est sans doute par une application de ce type qu'il serait souhaitable de débiter. En effet, on peut se contenter d'une "boîte-à-outils" plus limitée. Par ailleurs, dans ce cadre-ci, les erreurs conceptuelles ne porteraient pas vraiment à conséquences. Cette application constituerait donc un banc d'essai idéal.



Parallèlement à ces deux applications, il serait très opportun de développer un système d'aide à la conception de modèles. En effet, l'ampleur de l'investissement à consentir pour réaliser une telle "boîte-à-outils" impose une exploitation maximale de celle-ci et donc une large extension de la gamme des modèles analysés. Les algorithmes d'interprétation serviraient alors à tester si le modèle reflète bien les connaissances d'un expert du domaine.

Avant d'investir quoique ce soit, il vaudrait cependant mieux s'assurer que la physique qualitative constitue bien une solution optimale. Nous osons dire que la physique qualitative est une bonne solution, et nous sommes confiants en ses développements ultérieurs. Mais peut-être serait-il utile d'évaluer au préalable d'autres démarches théoriques. Nous songeons en particulier à la logique floue, déjà choisie par une frange importante de la communauté scientifique.

## BIBLIOGRAPHIE

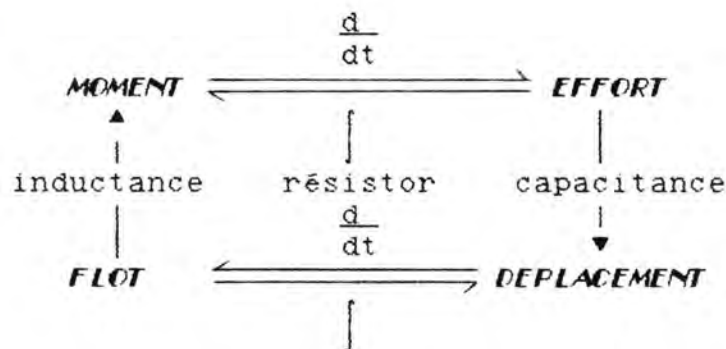
- [1] \*. micro-PROLOG 3.1 Programmers reference manuel. Logic Programming Associates Ltd.
- [2] K. L. Clark et F. G. Mc Cabe. micro-PROLOG, Programming in logic. Prentice-Hall International series in computer science.
- [3] Johan De Kleer et John Seely Brown. A qualitative physics based on confluences. Artificial Intelligence 24 (1984) 7 - 83.
- [4] Kenneth D. Forbus. Qualitative process theory. Artificial Intelligence 24 (1984) 85 - 168.
- [5] Benjamin Kuipers. Commonsense reasoning about causality : deriving behavior from structure. Artificial Intelligence 24 (1984) 169 - 203.
- [6] Benjamin Kuipers et Jerome P. Kassirer. How to discover a knowledge representation for causal reasoning by studying an expert physician. Proceedings eighth international joint conference on artificial intelligence, Karlsruhe, Germany, August 1983.
- [7] J. Lefebvre, R. Fabri et J. Barreto. An authoring system for computer aided instruction and simulation in physiology.
- [8] Ramesh S. Patil, Peter Szolovitz et William B. Schwartz. Causal understanding of patient illness in medical diagnosis. Proceedings of the seventh international joint conference on artificial intelligence, vol 2. 893 - 899 (1981). (\*)
- [9] H. Pouleur, C van Eyll, J Coll, J. W. Covell et A. A. Charlier. A model of circulatory regulation as a help system in therapy of acute medical infarction. Computers in cardiology. September 1979.
- [10] Edward Shortliffe, Bruce G. Buchanan et Edward A. Feigenbaum. Knowledge engineering for medical decision making : a review of computer-based clinical decision aids. Proceedings of the IEEE, 67 : 1207 - 1224. (1979) (\*)
- [11] Edward H. Shortliffe et William J. Clancey. Anticipating the second decade. Readings in medical artificial intelligence. Addison-Wesley (1984).

(\*) Cet article a également été publié dans les Readings in medical artificial intelligence de E. Shortliffe et W. Clancey. Addison-Wesley (1984).



## ANNEXE A. LES GRAPHES DE LIAISON

Les *graphes de liaison* constituent un formalisme puissant pour la modélisation d'une large gamme de dispositifs physiques. Lorsque l'on étudie un domaine particulier de la physique (électricité, mécanique, thermodynamique ...) on rencontre généralement une grandeur de type "*Effort*" ( par exemple un potentiel électrique, une force, une température, une pression ), une grandeur de type "*Déplacement*" ( une charge électrique, une longueur, de la chaleur, un volume ), une grandeur de type "*Flot*" ( un courant électrique, une vitesse, un flux de chaleur, un débit volumétrique ) et une grandeur de type "*Moment*" ( un flux magnétique, une quantité de mouvement ... ). Ces grandeurs sont reliées entre elles par des relations fort semblables d'un domaine à l'autre. Par exemple, en électricité, la charge d'un condensateur vaut le produit de sa capacité et de la différence de potentiels appliquée à ses bornes, en hydrolique, le volume d'un réservoir élastique vaut le produit de sa compliance et de la différence de pressions entre l'intérieur et l'extérieur du réservoir... On peut résumer toutes ces relations sur le graphique suivant :



Dans chacun de ces domaines, on rencontre des "objets" analogues imposant un certain nombre de relations entre des quantités de même type. Par soucis de simplicité, nous avons considéré uniquement les dipôles.

Source d'effort : impose un "Effort" sur le dispositif. Par exemple, une source de tension, une source de température, une source de pression...

Source de flot : impose un "Flot". ( une source de courant, de chaleur... )

Résistor : impose une relation entre les grandeurs de type "Effort" et "Déplacement" et dissipe de l'énergie.

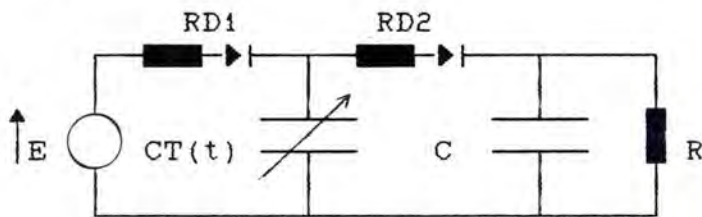
Capacitance : emmagasine de l'énergie potentielle et impose une relation entre l'"Effort" et le "Déplacement".

Inductance : emmagasine de l'énergie cinétique et impose une relation entre le "Flot" et le "Moment".

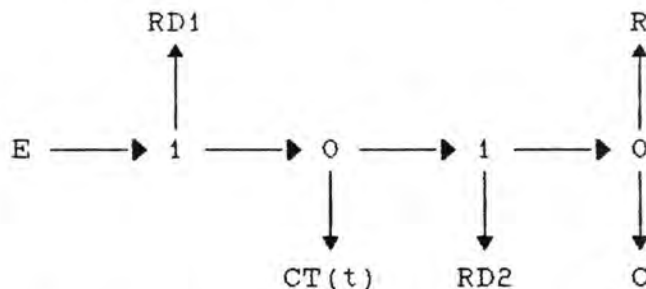
Ces différents objets peuvent être connectés entre eux et leurs connexions sont représentées au moyen des graphes de liaison.

- Un **arc** du graphe de liaison veut dire "est connecté".
- Un **noeud 0** signale une jonction parallèle, c'est à dire une jonction telle que l'"Effort" appliqué aux éléments connectés est identique.
- Un **noeud 1** indique une jonction série, c'est à dire une jonction telle que le "Flot" passant par les éléments connectés est identique.

Toutes ces notions deviennent évidentes lorsqu'elles sont appliquées sur un exemple. Nous avons conservé notre exemple du ventricule gauche isolé.



Nous en déduisons le graphe de liaison suivant :



Dans certains cas, ces graphes peuvent être augmentés en **graphe de liaison causal**. Il ne s'agit cependant pas de causalité dans le sens traditionnel du terme, mais plutôt d'une "causalité de calcul". Si l'on a  $V = f(I)$ ,  $V$  et  $I$  varient simultanément. On ne peut donc en déduire aucune causalité, mais cette absence de causalité peut provenir d'une des hypothèses introduites lors de la modélisation. On peut avoir supposé négligeable, le temps nécessaire pour qu'une telle causalité puisse s'exercer ! En fait, la causalité des graphes de liaison nous paraît correspondre à la causalité mythique de De Kleer et Brown.

Lorsque l'on détermine la causalité d'un graphe de liaison, on utilise les notations suivantes :

Si un élément impose une tension, sa connexion est notée :



Si un élément impose un courant, alors sa connexion est notée :

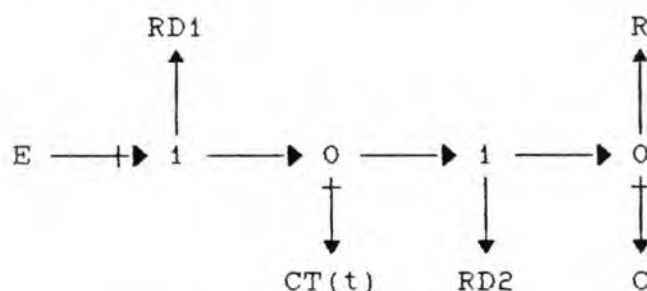




Si l'on adopte cette notation, la causalité des différents dipôles peut se noter de cette manière :

<b>Source d'effort</b>	
<b>Source de flot</b>	
<b>Résistor</b>	
<b>Capacitance</b>	
<b>Inductance</b>	

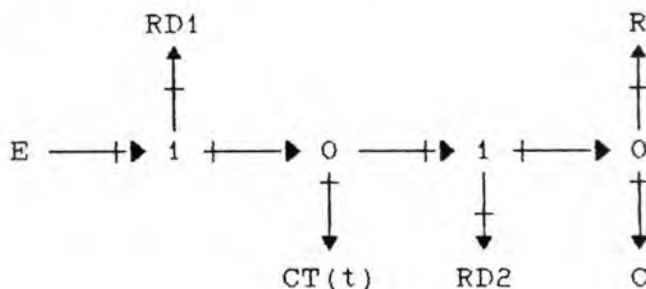
Nous pouvons dès à présent établir certaines des causalités du graphe de liaison de notre exemple



Il existe un certain nombre de règles dérivées des lois de connections, ( lois de Kirchhoff en électricité ... ) pour propager la causalité au travers d'un graphe de liaison :

- Sur une jonction parallèle, on ne peut appliquer qu'un seul effort.
- Sur une jonction série, on ne peut appliquer qu'un seul flot.
- Sur une jonction parallèle, on peut imposer tous les flots sauf un.
- Sur une jonction série, on peut imposer tous les efforts sauf un.

Si l'on applique ces règles à l'exemple du modèle électrique du ventricule isolé, on obtient finalement le graphe de liaison causal suivant :



Lorsque tout se déroule pour le mieux, chaque connexion reçoit une et une seule "barre" de causalité. Ce n'est cependant pas toujours le cas. Tous les graphes de liaison ne peuvent être augmentés.

Les dispositifs physiques dont le graphe de liaison peut être augmenté présentent une propriété remarquable. En effet, les équations de ces dispositifs peuvent être écrites sous une forme procédurale. Voici comment procéder :

- Prendre les sources et exprimer ce qu'elles imposent ;
- Faire de même avec les autres éléments et trier les équations obtenues de sorte que le flot ou l'effort qu'elles imposent puisse être déterminé au moyen des valeurs précédemment calculées ;
- Prendre les variables d'état, et exprimer les grandeurs reçues ;

Si on applique cette méthode à notre exemple, on trouve les équations suivantes :

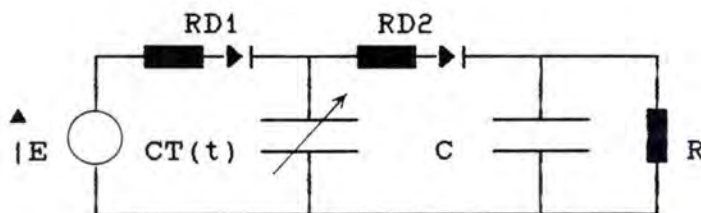
```

E = Q̇(t) ;
PCT = (QCT - QCT0) / CT(t) ;
PC = (QC - QC0) / C ;
IF E > PCT THEN ID1 = (E - PCT) / RD1PA
                ELSE ID1 = (E - PCT) / RD1BLO ;
IF PCT > PC THEN ID2 = (PCT - PC) / RD2PA
                ELSE ID2 = (PCT - PC) / RD2PA ;
IR = PC / R ;
ICT = ID1 - ID2 ;
dQC/dt = IC ;
dQCT/dt = ICT ;

```



## ANNEXE B. CONFLUENCES DU MODELE DU VENTRICULE GAUCHE



En nous servant des confluences et des états qualitatifs établis pour le condensateur à capacité variable, on peut déterminer les confluences et les états qualitatifs du **ventricule gauche**. Nous supposons que VCT est toujours positif.

<i>Gonfle</i>	[ $ICT > 0$ ]	$\Rightarrow$	$\partial CT(t) + \partial VCT = +$
<i>Stable</i>	[ $ICT = 0$ ]	$\Rightarrow$	$\partial CT(t) + \partial VCT = 0$
<i>Dégonfle</i>	[ $ICT < 0$ ]	$\Rightarrow$	$\partial CT(t) + \partial VCT = -$

Les confluences de l'**aorte** peuvent également être déterminées de cette manière.

<i>Gonfle</i>	[ $IC > 0$ ]	$\Rightarrow$	$\partial VC = +$
<i>Stable</i>	[ $IC = 0$ ]	$\Rightarrow$	$\partial VC = 0$
<i>Dégonfle</i>	[ $IC < 0$ ]	$\Rightarrow$	$\partial VC = -$

On peut distinguer deux états qualitatifs différents dans le comportement des valves. Elles sont soit ouvertes, soit fermées. Nous avons donc les confluences suivantes pour chacune des valves.

### Valve mitrale :

<i>Ouverte</i>	[ $VRD1 > 0$ ou $= 0$ ]	$\Rightarrow$	$\partial IRD1 = +$
<i>Fermée</i>	[ $VRD1 < 0$ ]	$\Rightarrow$	$\partial IRD1 = 0$

### Valve Aortique :

<i>Ouverte</i>	[ $VRD2 > 0$ ou $= 0$ ]	$\Rightarrow$	$\partial IRD2 = +$
<i>Fermée</i>	[ $VRD2 < 0$ ]	$\Rightarrow$	$\partial IRD2 = 0$

Le comportement des **capillaires** peut être décrit très simplement au moyen d'un seul état qualitatif et d'une seule confluence.

$$\partial IR = \partial VR$$

Il ne reste plus qu'à ajouter les confluences dérivées des  
*lois de connexion.*

$$\partial I_{RD1} = \partial I_{RD2} + \partial I_{CT}$$

$$\partial I_{RD2} = \partial I_C + \partial I_R$$

$$\partial E = \partial V_{RD1} + \partial V_{CT}$$

$$\partial V_{CT} = \partial V_C + \partial V_{RD2}$$

$$\partial V_C = \partial V_R$$

$$\partial E = \partial V_{RD1} + \partial V_{RD2} + \partial V_C$$

$$\partial E = \partial V_{RD1} + \partial V_{RD2} + \partial V_R$$

$$\partial V_{CT} = \partial V_C + \partial V_R$$



# ANNEXE C. EXEMPLE DE TABLEAU DES ETATS QUALITATIFS

	$\partial C(t) = -$					$\partial C(t) = 0$					$\partial C(t) = +$		
Valve	Ouverte	Fermée	Fermée	Fermée	Fermée	Fermée	Ouverte	Fermée	Fermée	Fermée	Fermée	Ouverte	
Mitrale	$VRD1 > 0$	$VRD1 < 0$	$VRD1 < 0$	$VRD1 < 0$	$VRD1 < 0$	$VRD1 < 0$	$VRD1 > 0$	$VRD1 < 0$	$VRD1 < 0$	$VRD1 < 0$	$VRD1 < 0$	$VRD1 > 0$	
Valve	Fermée	Fermée	Ouverte	Ouverte	Ouverte	Ouverte	Fermée	Fermée	Ouverte	Fermée	Fermée	Fermée	
Aortique	$VRD2 < 0$	$VRD2 < 0$	$VRD2 > 0$	$VRD2 > 0$	$VRD2 > 0$	$VRD2 > 0$	$Vvg < 0$	$Vvg < 0$	$Vvg > 0$	$Vvg < 0$	$Vvg < 0$	$Vvg < 0$	
Ventricule	Gonfle	Stable	Dégonfle	Dégonfle	Dégonfle	Dégonfle	Gonfle	Stable	Dégonfle	Stable	Gonfle		
	$ICT > 0$	$ICT = 0$	$ICT < 0$	$ICT < 0$	$ICT < 0$	$ICT < 0$	$ICT > 0$	$ICT = 0$	$ICT < 0$	$ICT = 0$	$ICT < 0$	$ICT > 0$	
Aorte	Dégonfle	Dégonfle	Dégonfle	Stable	Gonfle	Dégonfle	Dégonfle	Dégonfle	Dégonfle	Dégonfle	Dégonfle	Dégonfle	
	$IC < 0$	$IC < 0$	$IC < 0$	$IC = 0$	$IC > 0$	$IC < 0$	$IC < 0$	$IC < 0$	$IC < 0$	$IC < 0$	$IC < 0$	$IC < 0$	
	1	1	1 2 3 4 5 6 7	1 2 3	1 2 3 4 5 6 7	1 2 3 4 5	1 2 3	1	1 2 3 4 5	1 2 3	1 2 3 4 5		
$\partial C(t)$	-	-	- - - - - - -	- - -	- - - - - - -	0 0 0 0 0	0 0 0	0	+ + + + +	+ + +	+ + + + +		
$\partial IRD1$	-	0	0 0 0 0 0 0 0	0 0 0	0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0	+ + +	0	0 0 0 0 0	0 0 0	+ + + 0 -		
$\partial IRD2$	0	0	+ + - - - + 0	+ 0 -	- - + + + 0 -	+ 0 - - -	0 0 0	0	+ 0 - - -	0 0 0	0 0 0 0 0		
$\partial ICT$	-	0	- - + + + - 0	- 0 +	+ + - - - 0 +	- 0 + + +	+ + +	0	- 0 + + +	0 0 0	+ + + 0 -		
$\partial IC$	+	+	+ + - 0 + + +	+ 0 -	- - + 0 - - -	+ + - 0 +	0 0 0	+	+ + + 0 -	+ + +	+ + + + +		
$\partial IR$	-	-	- - - - - - -	0 0 0	+ + + + + + +	- - - - -	+ + +	-	- - - - -	- - -	- - - - -		
$\partial VRD1$	-	-	- 0 + + + + +	- 0 +	+ 0 - - - - -	+ + + + +	+ + +	0	+ + + + +	+ + +	+ + + 0 -		
$\partial VRD2$	+	+	+ + - - - + 0	+ 0 -	- - + + + 0 -	+ 0 - - -	- - -	+	+ 0 - - -	- 0 +	+ 0 - + +		
$\partial VCT$	+	+	+ 0 - - - - -	+ 0 -	- 0 + + + + +	- - - - -	+ 0 -	0	- - - - -	- - -	- - - 0 +		
$\partial VC$	-	-	- - - - - - -	0 0 0	+ + + + + + +	- - - - -	- - -	-	- - - - -	- - -	- - - - -		
$\partial VR$	-	-	- - - - - - -	0 0 0	+ + + + + + +	- - - - -	- - -	-	- - - - -	- - -	- - - - -		

Tableau partiel des états qualitatifs du modèle du ventricule gauche isolé

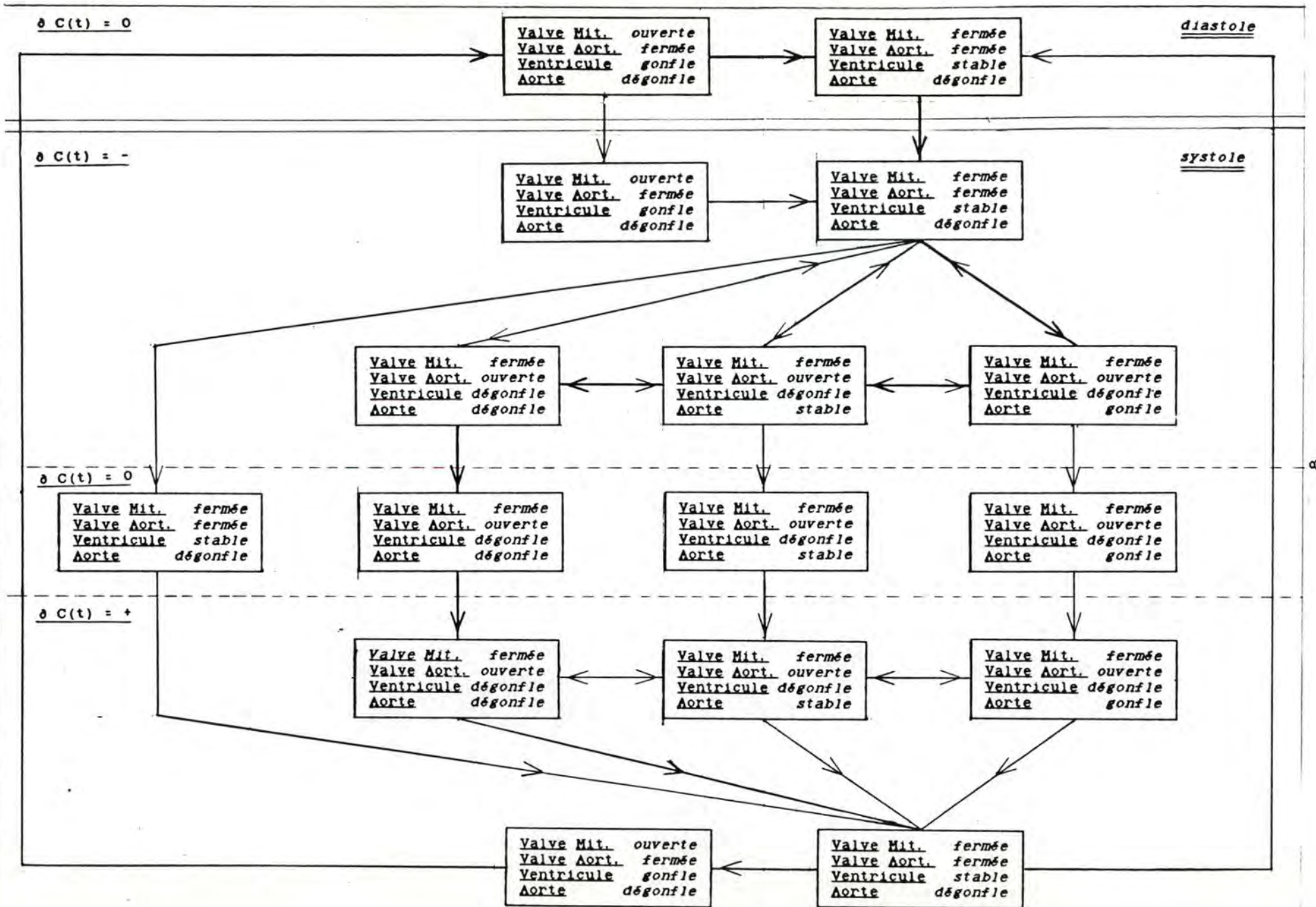


Diagramme partiel des épisodes du modèle  
du ventricule gauche isolé